

③ 体核 **力** へのアプローチ

Part 1 導入

核力研究(理論)

東北大学大学院理学研究科

関口仁子



TOHOKU
UNIVERSITY

講義のテーマ

原子核物理学

20世紀初頭に生まれた”古くて新しい物理学”

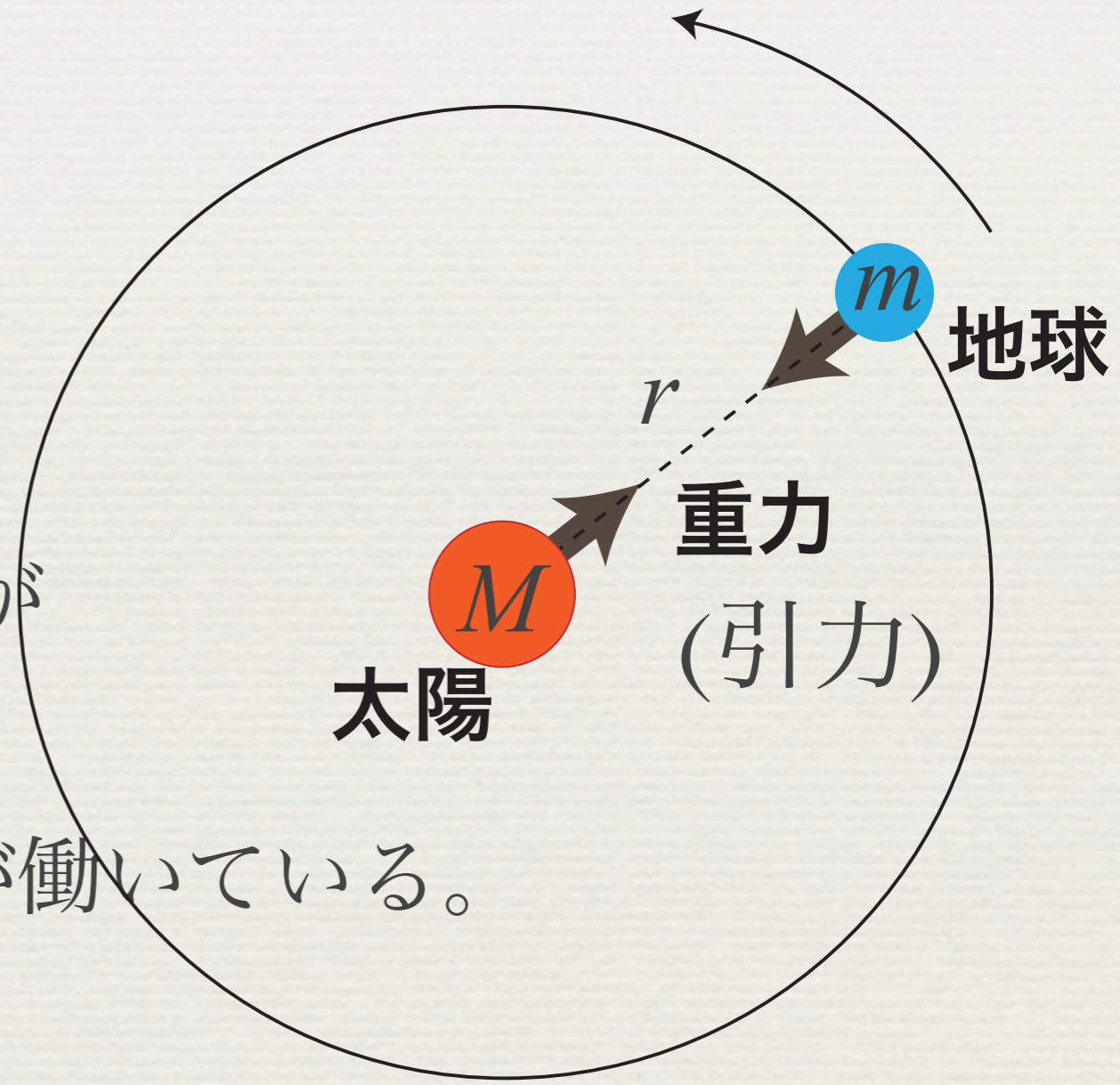
原子核の中で働く **力** が講義のテーマ

重 力 (万有引力)



$$\text{力 } F = G \frac{mM}{r^2}$$

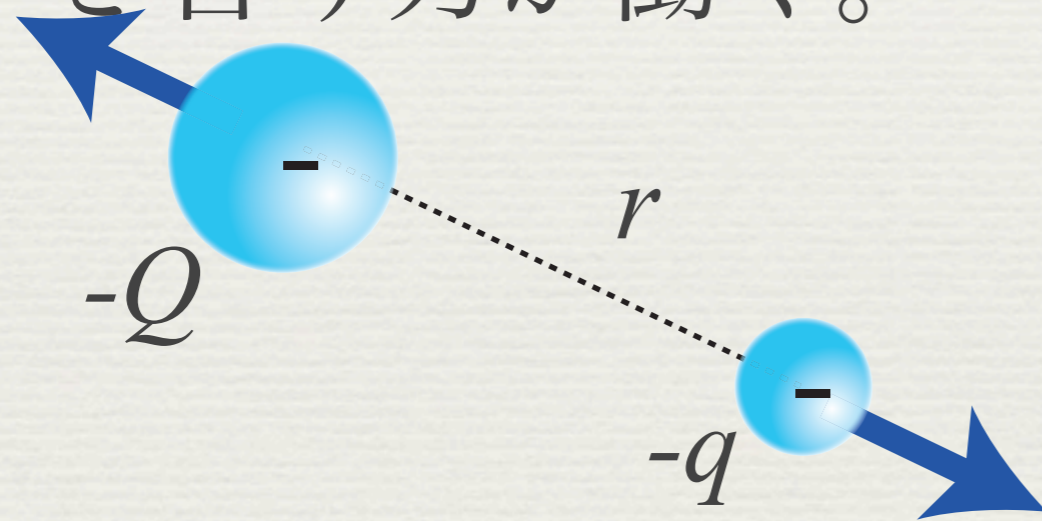
- 太陽系：
 - 中心には太陽が存在し、太陽の周囲を地球などの惑星が公転している。
 - 太陽と地球の間には、重力が働いている。



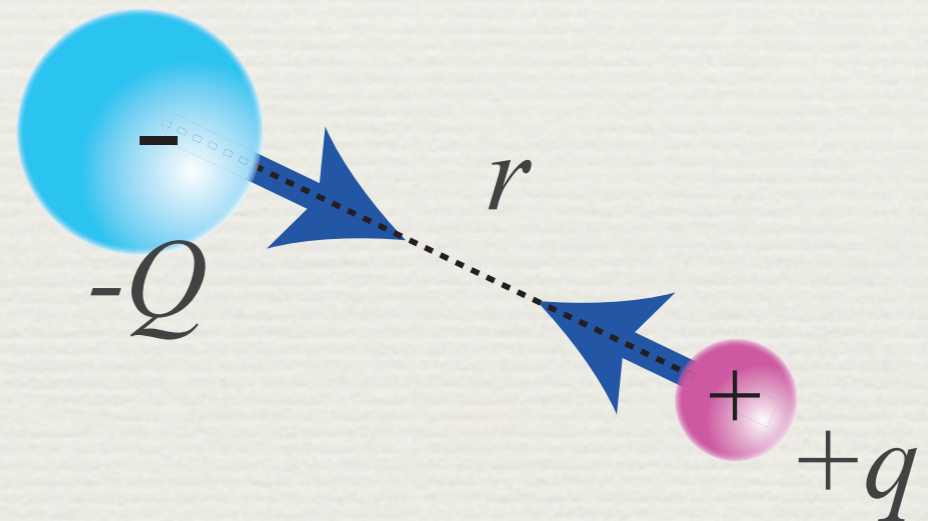
電気力

$$力 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$

- ◆ 電荷を持った物体の間では、反発または引き合う力が働く。



同じ符号の電荷の物体は
反発(斥力)



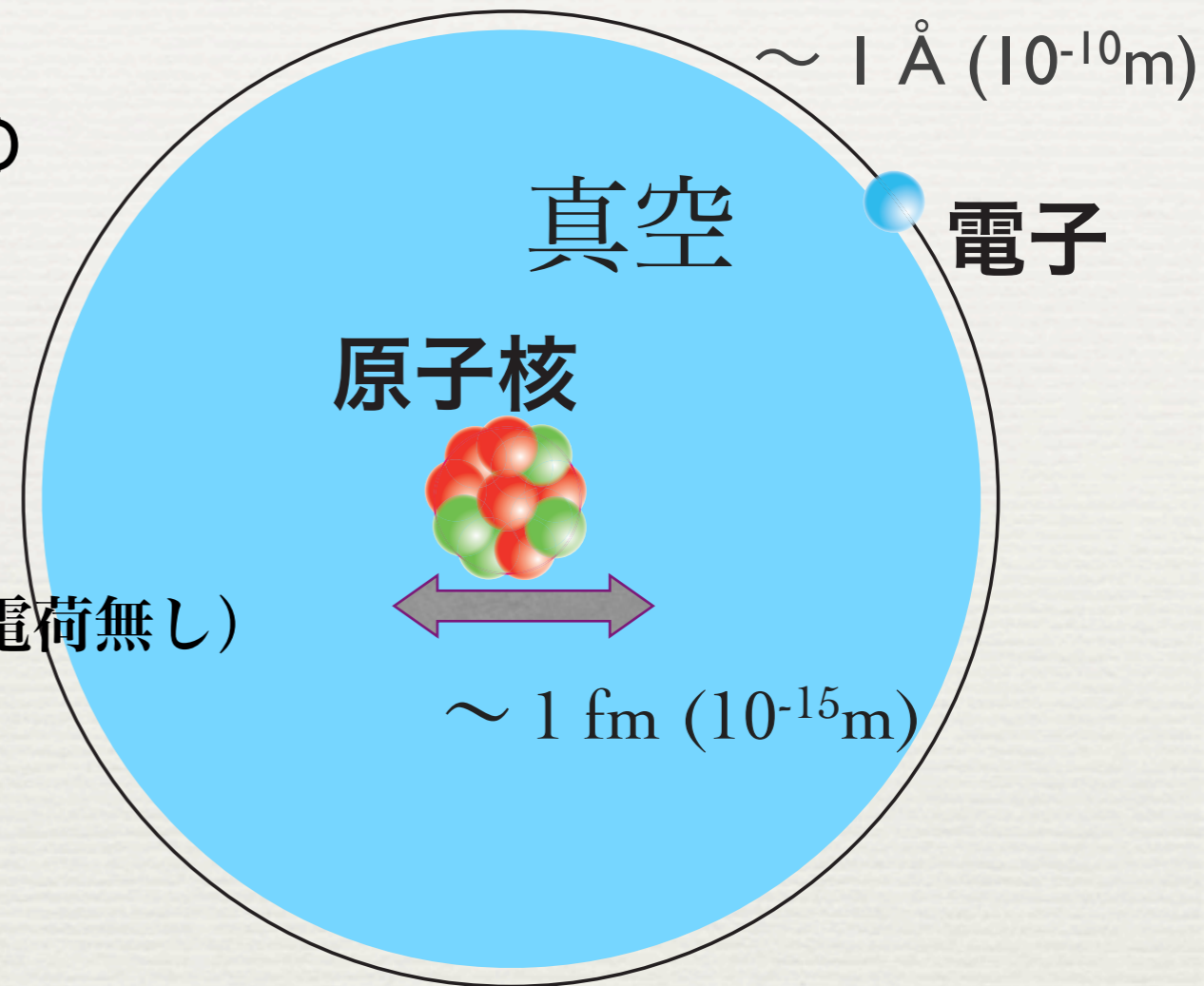
符号の異なる電荷をもった
物体は引き合う(引力)

原子核の力

1911 原子核の発見 (ラザフォード)

- 原子の中心に存在
- 原子に比べてはるかに小さい半径
- 原子の重さの99%を占める

非常に狭い空間に陽子(+)と中性子(電荷無し)
が密集している

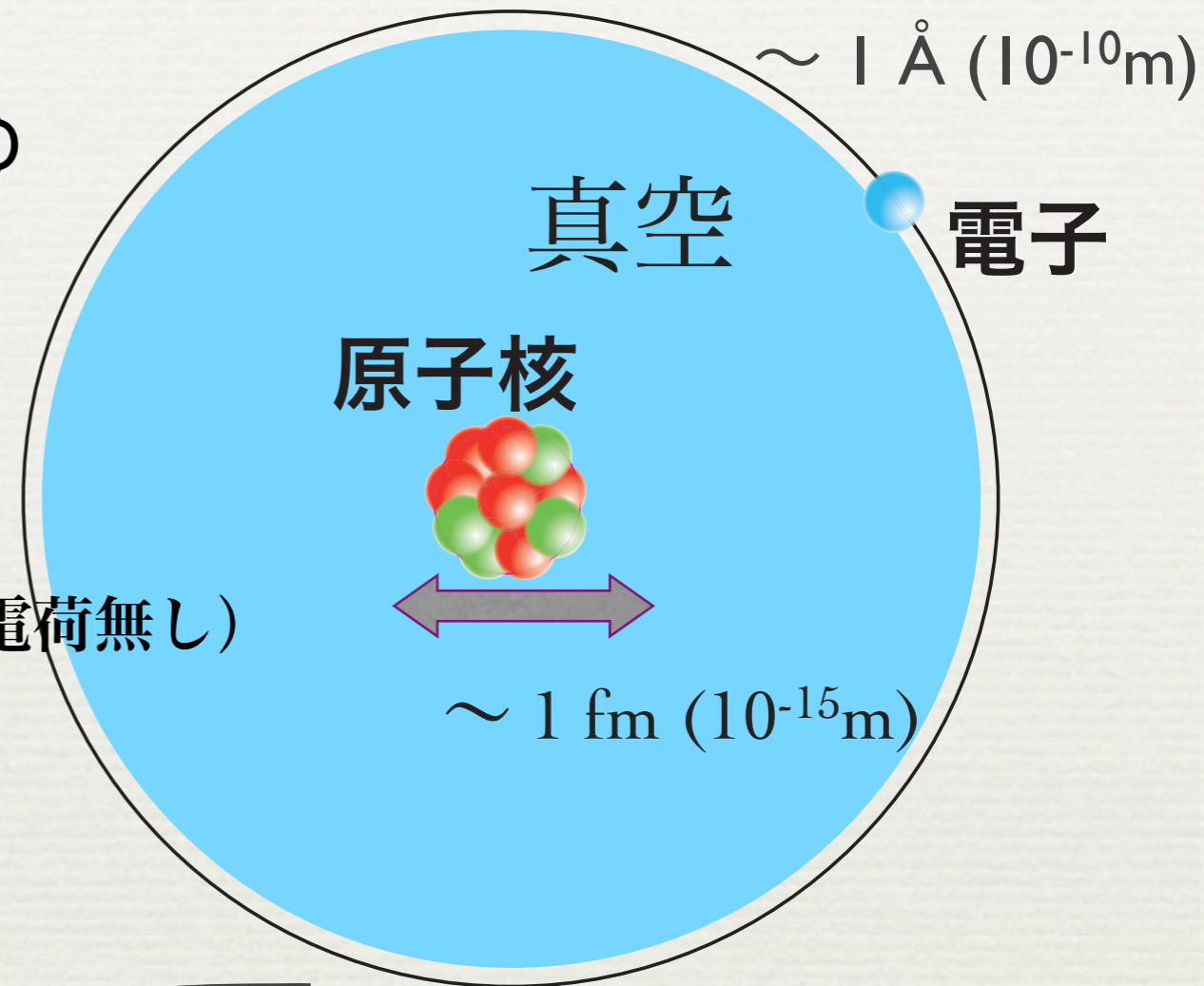


原子核の力

1911 原子核の発見 (ラザフォード)

- 原子の中心に存在
- 原子に比べてはるかに小さい半径
- 原子の重さの99%を占める

非常に狭い空間に陽子(+)と中性子(電荷無し)
が密集している



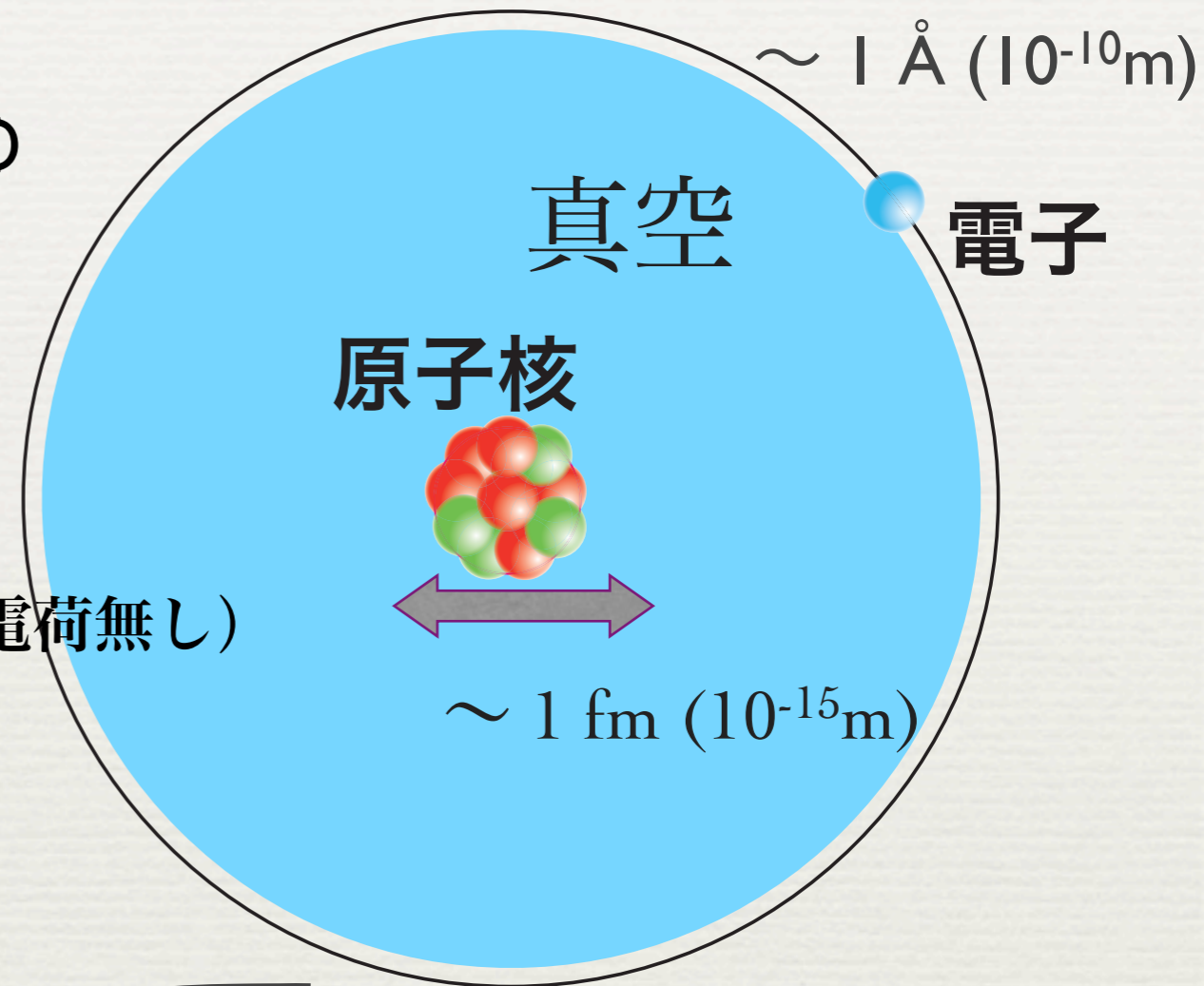
微小空間に陽子や中性子を閉じ込める力力の起源は？

原子核の力

1911 原子核の発見 (ラザフォード)

- 原子の中心に存在
- 原子に比べてはるかに小さい半径
- 原子の重さの99%を占める

非常に狭い空間に陽子(+)と中性子(電荷無し)
が密集している



微小空間に陽子や中性子を閉じ込める力力の起源は？

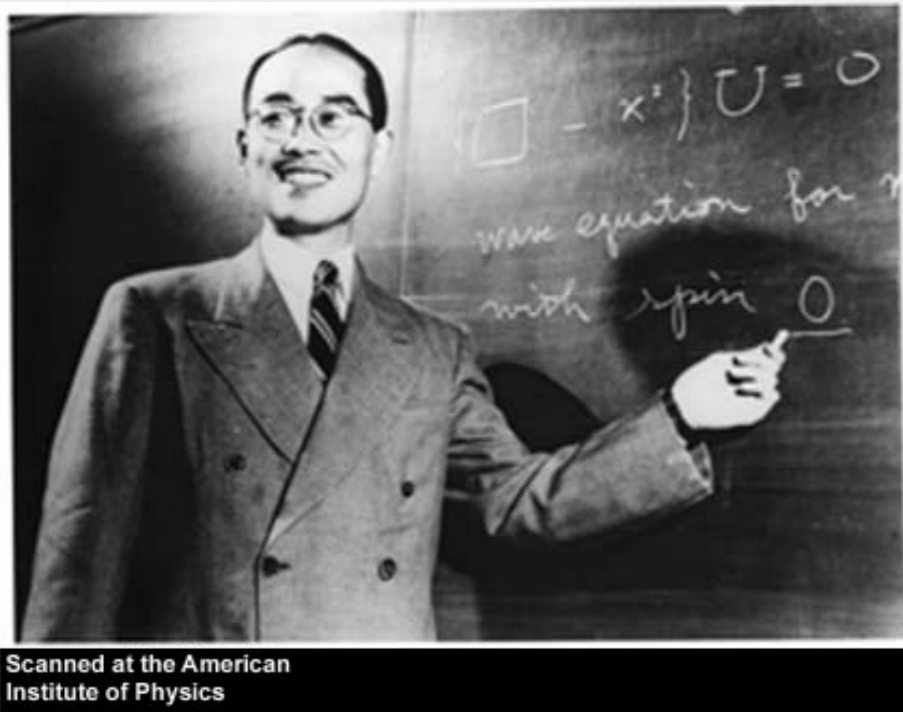
1920年代：量子力学の完成

原子核の **力** ～ 湯川秀樹のアイデア ～

- ◆ 原子核を形作る力を「核力」と呼ぶ。

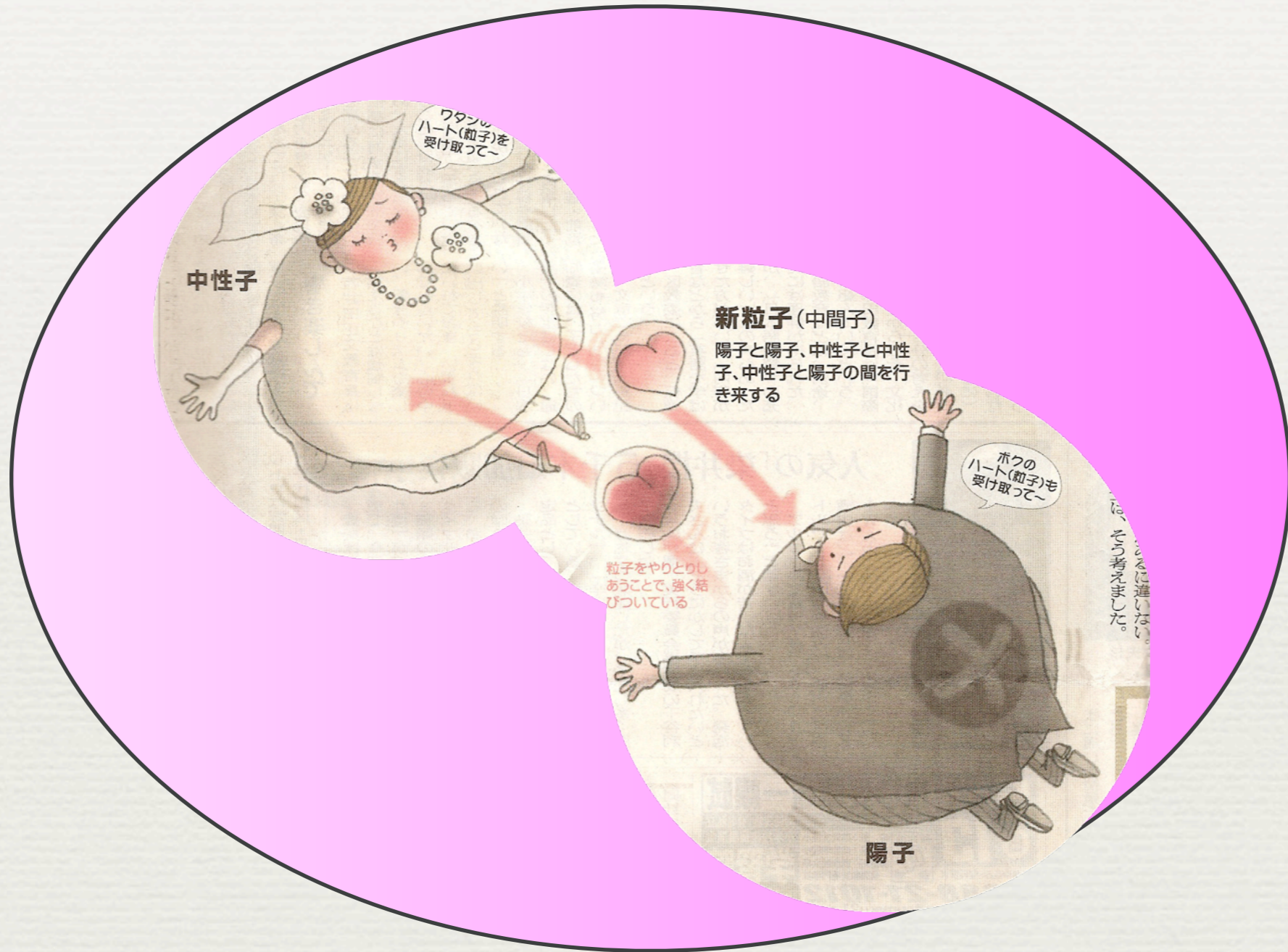
1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)

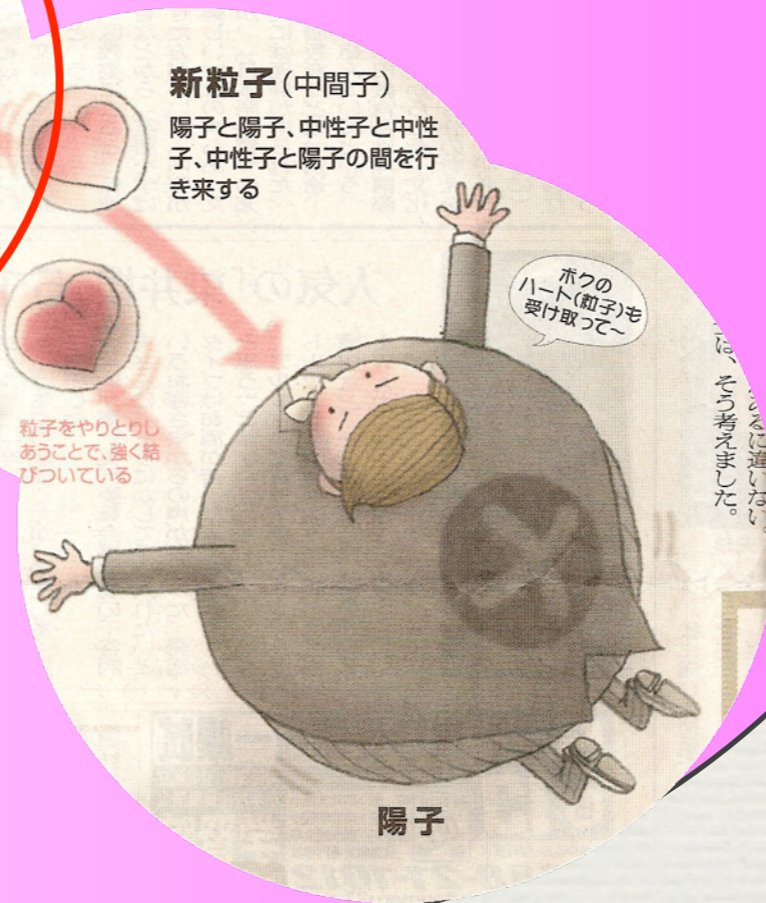
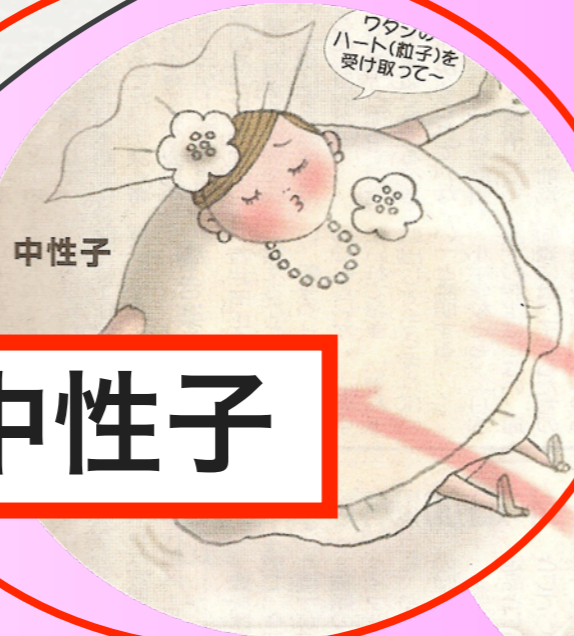


核力は陽子と中性子の間に

中間子(パイ中間子)という仮想的な粒子を交換する事によって生じる



中性子

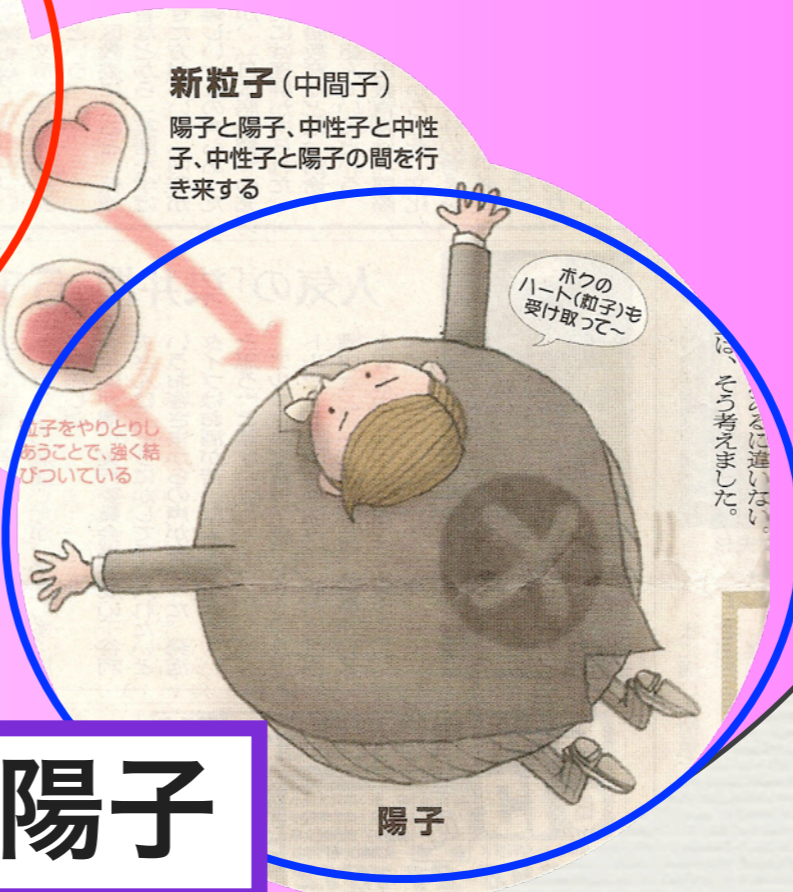


中性子

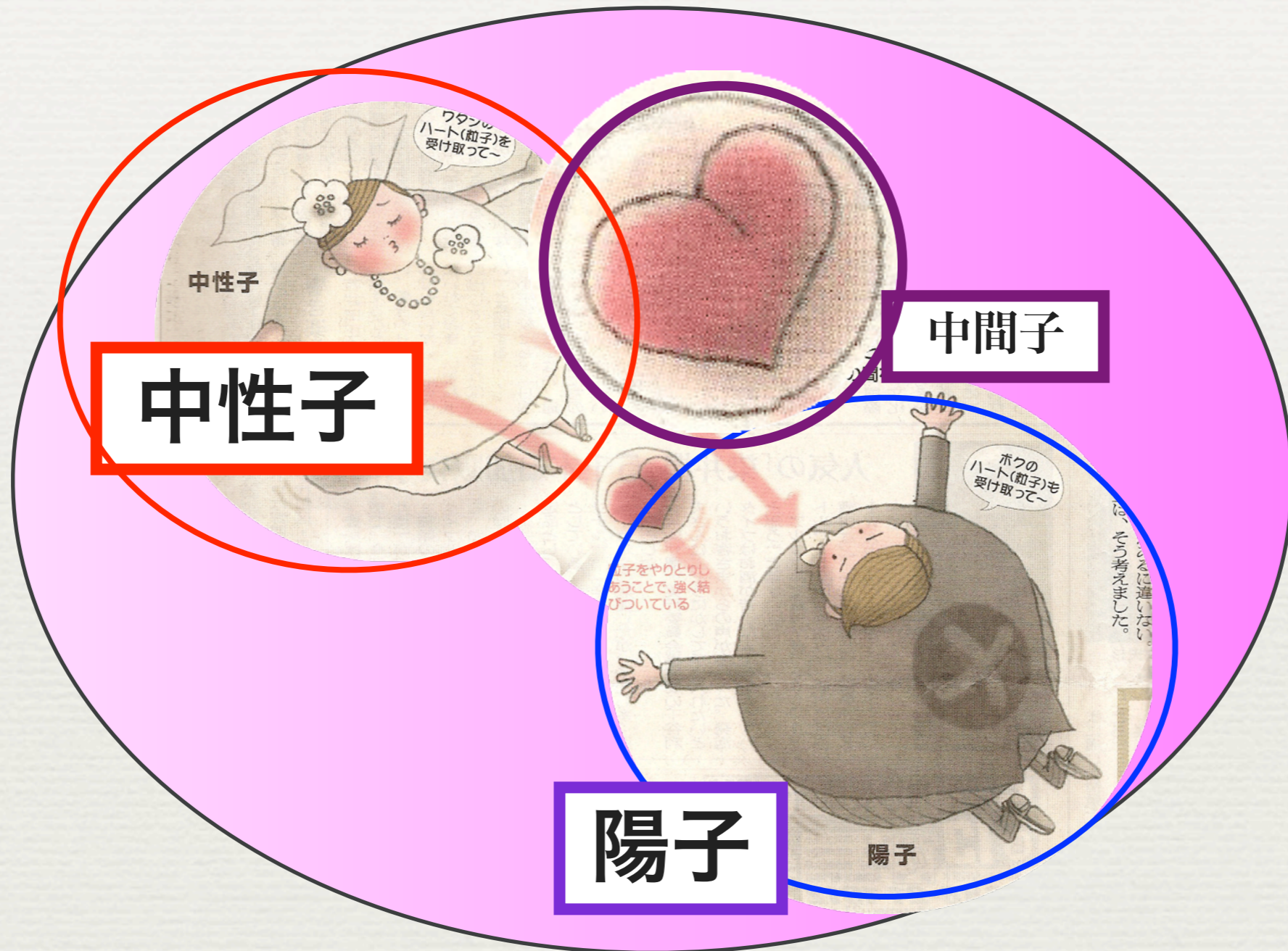


新粒子(中間子)

陽子と陽子、中性子と中性子、中性子と陽子の間を行き来する



陽子



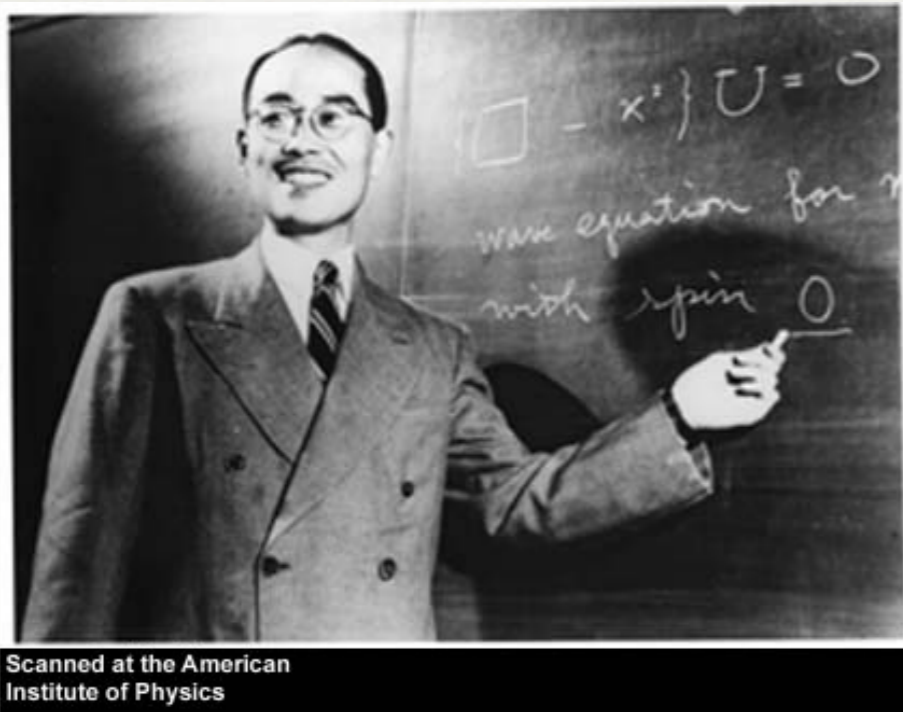
2007年5月2日朝日新聞より

原子核の **力** ～ 湯川秀樹のアイデア ～

- ◆ 原子核を形作る力を「核力」と呼ぶ.

1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)



核力は陽子と中性子の間に

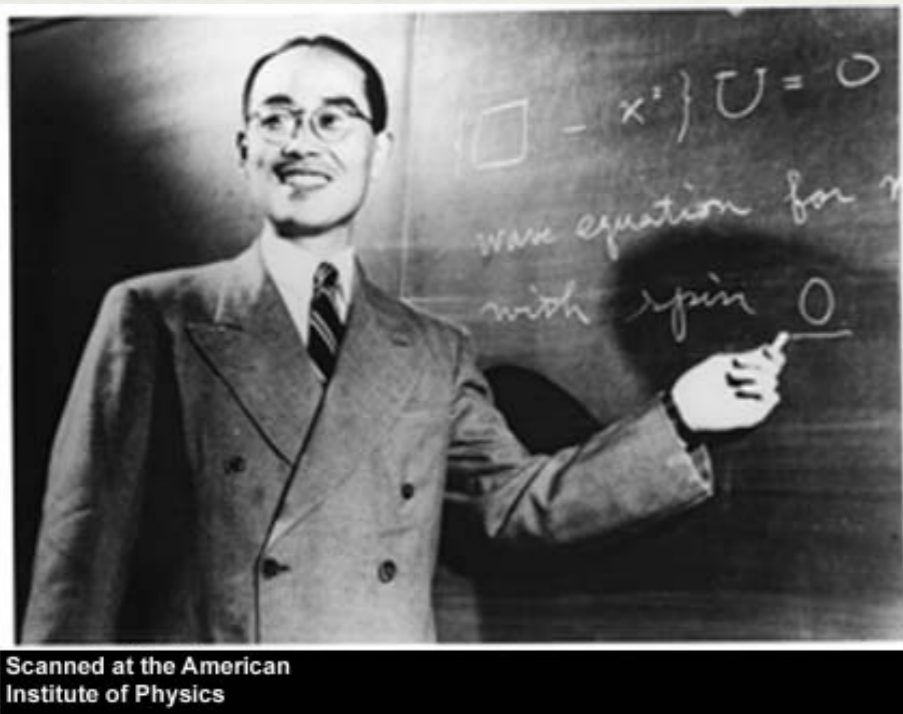
中間子(パイ中間子)という仮想的な粒子を交換する事によって生じる

原子核の **力** ～ 湯川秀樹のアイデア ～

- ◆ 原子核を形作る力を「核力」と呼ぶ。

1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)



この理論のすごいところ！

粒子の交換によって力を説明する

→場の理論の基盤

強い力(到達距離が短い力)の起源

量子力学の適用

核力は陽子と中性子の間に

中間子(パイ中間子)という仮想的な粒子を交換する事によって生じる

湯川秀樹の論文

Proceedings of the Physics-Mathematical Society of Japan 17卷48~57 ページ (1935年)

On the Interaction of Elementary Particles. I.

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

§1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction of elementary particles. Heisenberg considered the interaction of "Platzwechsel" between the neutron and the proton to be of importance to the nuclear structure.⁽¹⁾

Assuming $\lambda = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-1}$, we obtain for m_V a value 2×10^2 times as large as the electron mass. As such a quantum with large mass and positive or negative charge has never been found by the experiment, the above theory seems to be on a wrong line. We can show, however, that, in the ordinary nuclear transformation, such a quantum can not be emitted into outer space.

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U(r) = 0$$

$$U(r) = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}$$

$$\lambda = \frac{h}{mc}$$

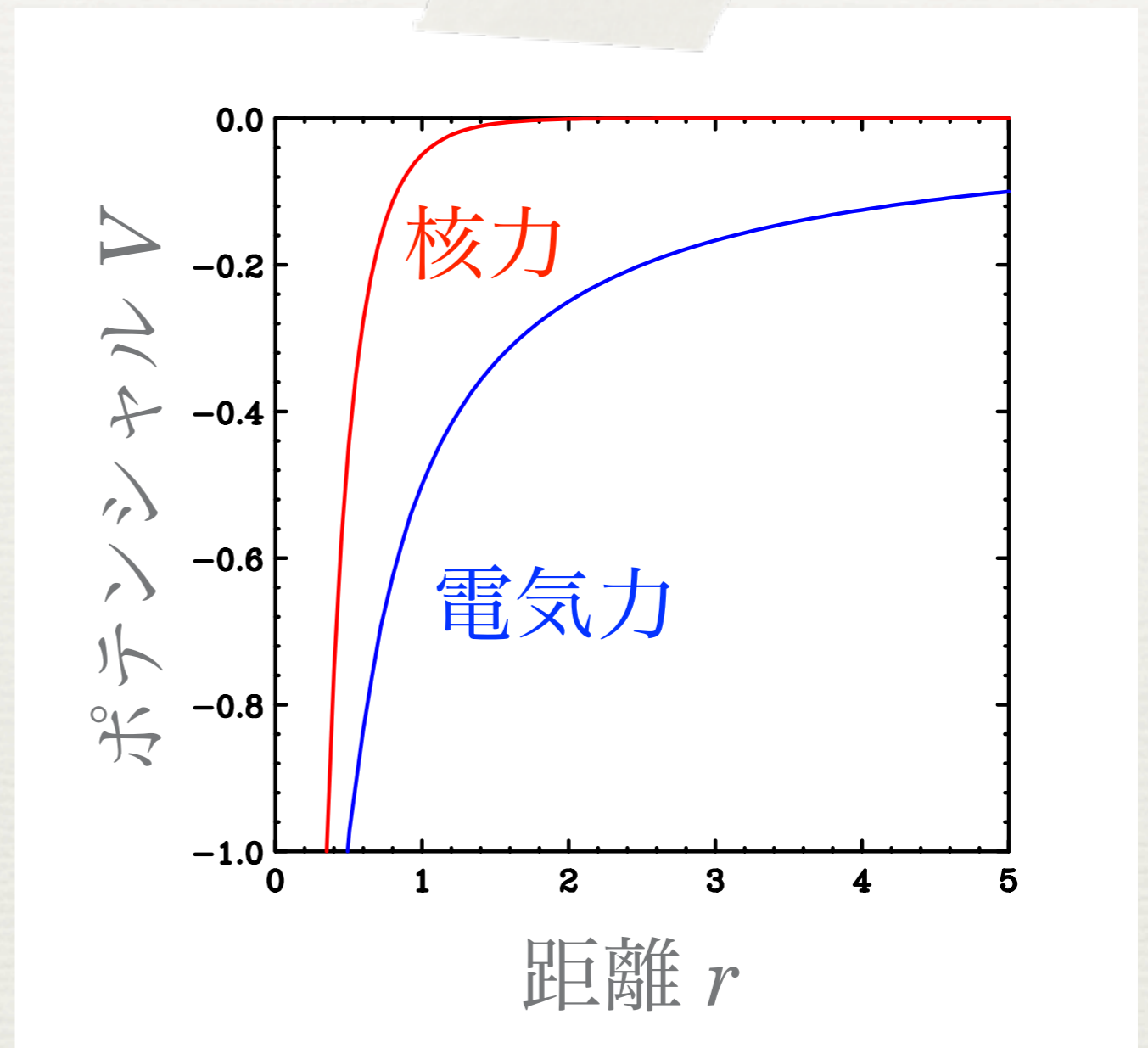
電気力と核力(湯川型)

- ◆ 電氣的ポテンシャル

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

- ◆ 湯川型の核力

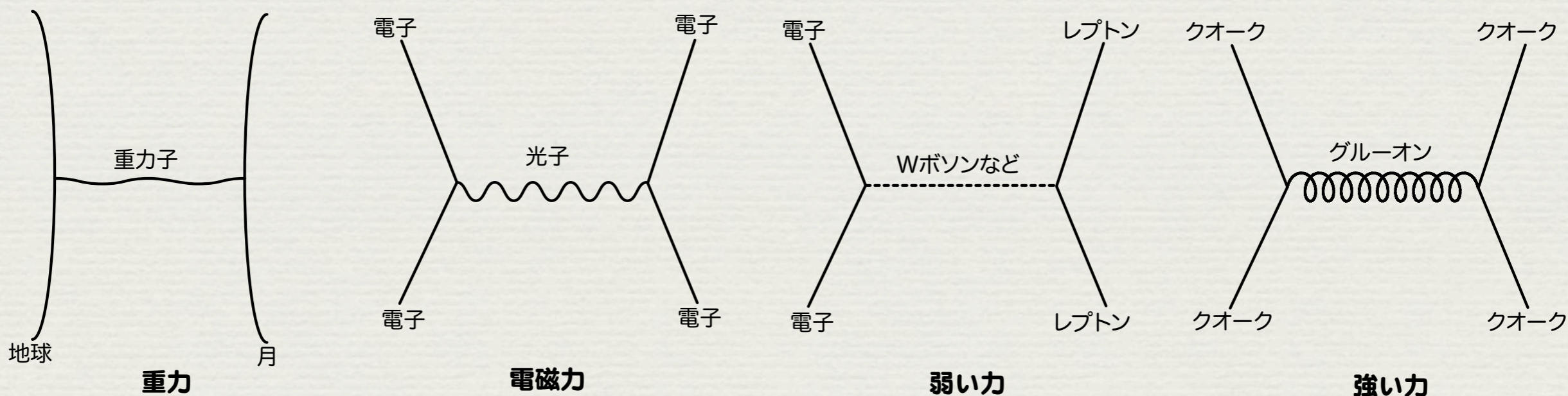
$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}$$



$$F = -\Delta V \left(= -\frac{dV}{dr} \right)$$

自然界の4つの力

力（相互作用）	重力	電磁気力	弱い力	強い力
長さ	10^8 m	10^{-10} m	$< 10^{-15}$ m	$< 10^{-15}$ m
力の大きさ	10^{-38}	10^{-2}	10^{-5}	1
仮想粒子	（重力子）	光子	W, Z ボゾン	グルーオン, 中間子
	地球—月—衛星	原子・分子	原子核崩壊 ニュートリノ	原子核 クォーク



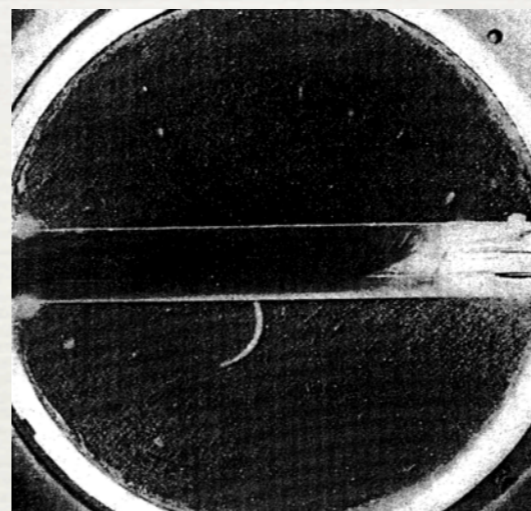
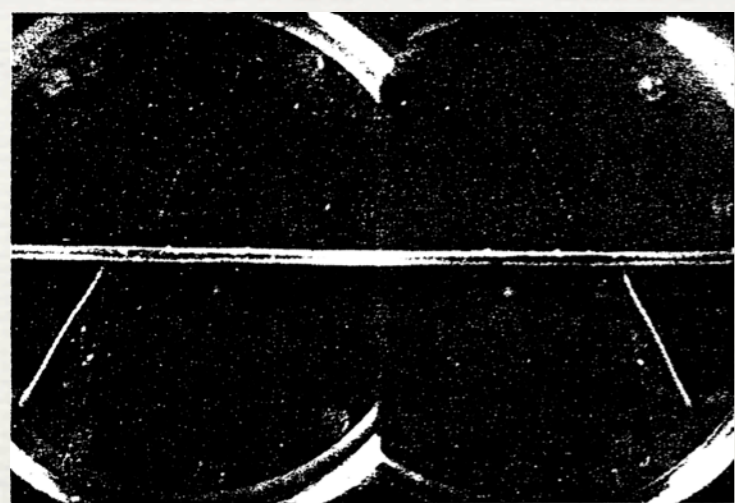
戦前

1935中間子論発表

1937アンダーソンら/仁科ら宇宙線の中に新粒子？
(ミュー粒子)

アンダーソンら

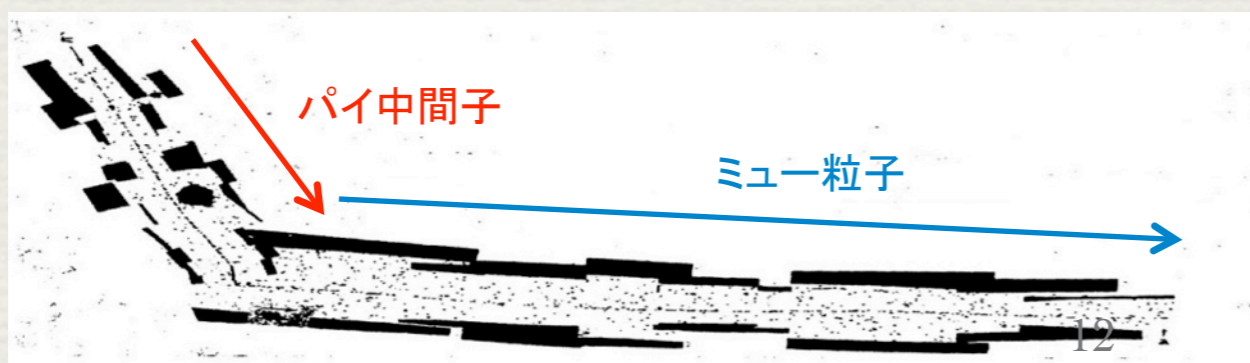
仁科芳雄ら



戦後

1947パウエルら宇宙線の中に湯川粒子発見(パイ中間子)

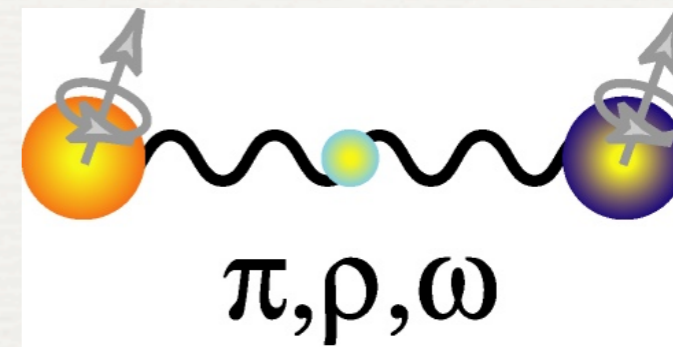
1949湯川 ノーベル物理学賞(日本人初のノーベル賞！)



原子核の **力**

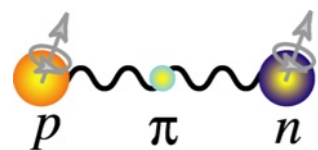
1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)

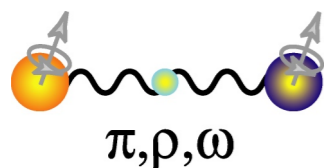


その後

理論



π 中間子交換に基づく核力理論



ρ 、 ω 中間子など π 中間子より
重い中間子を考慮した核力理論

実験

陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱

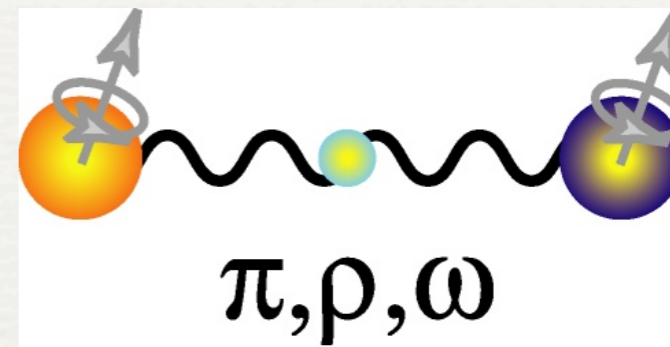
実験データの蓄積

(散乱微分断面積、スピン観測量)

原子核の 力

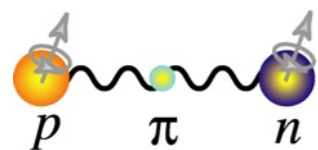
1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)

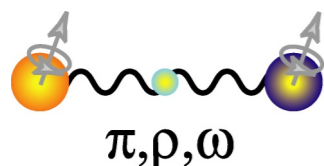


その後

理論



π 中間子交換に基づく核力理論



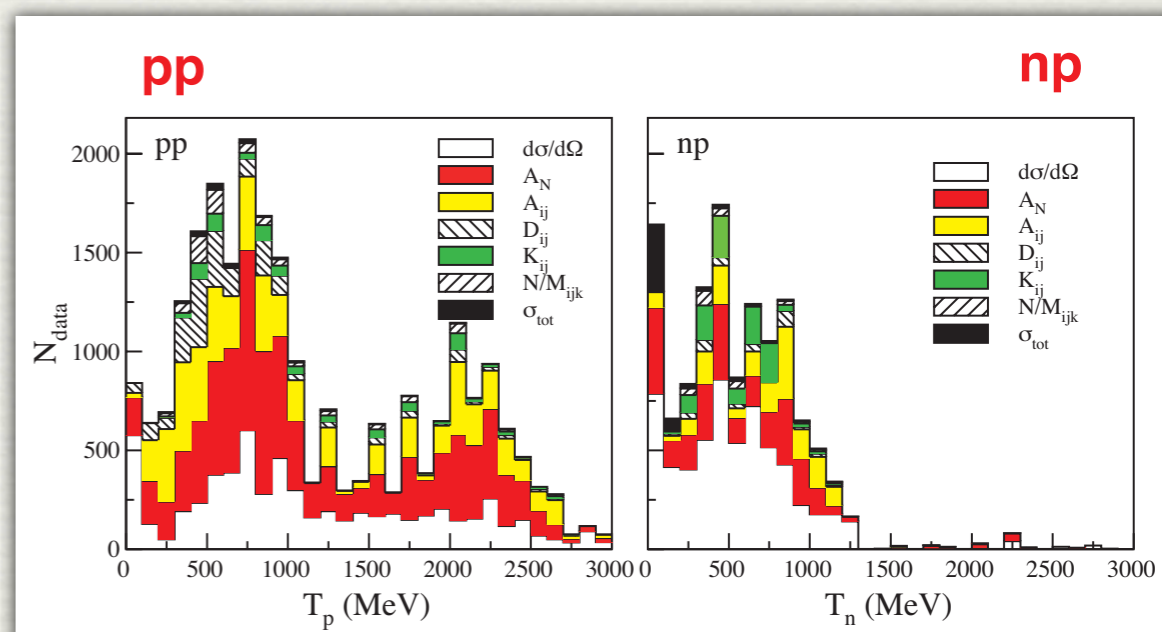
ρ, ω 中間子など π 中間子より
重い中間子を考慮した核力理論

実験

陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱

実験データの蓄積

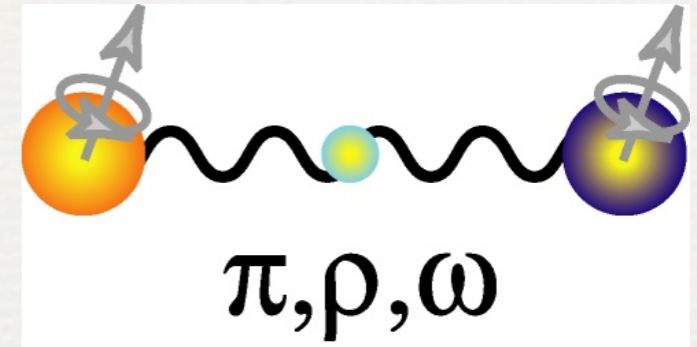
(散乱微分断面積、スピン観測量)



原子核の 力

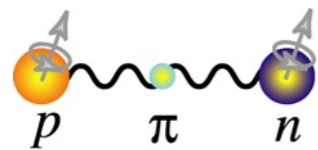
1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)

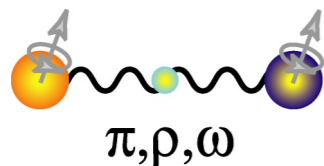


その後

理論



π 中間子交換に基づく核力理論



ρ 、 ω 中間子など π 中間子より重い中間子を考慮した核力理論

実験

陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱

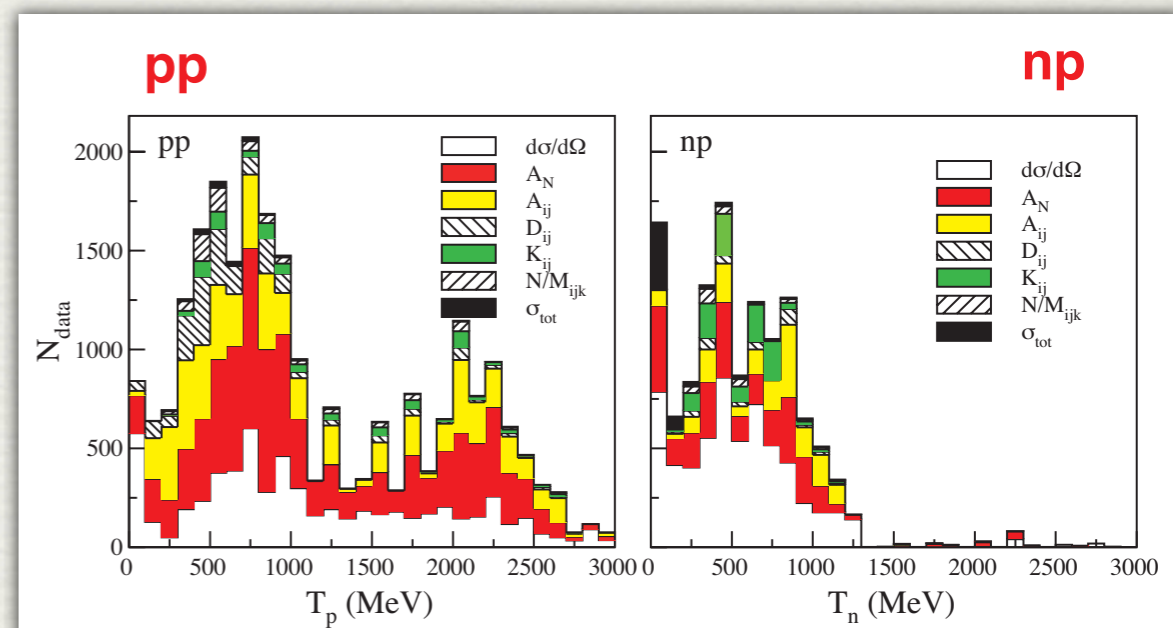
実験データの蓄積

(散乱微分断面積、スピン観測量)

1990年代 核力研究の転機

4000以上の核子-核子散乱データを
 $\chi^2 \sim 1$ の精度で再現する

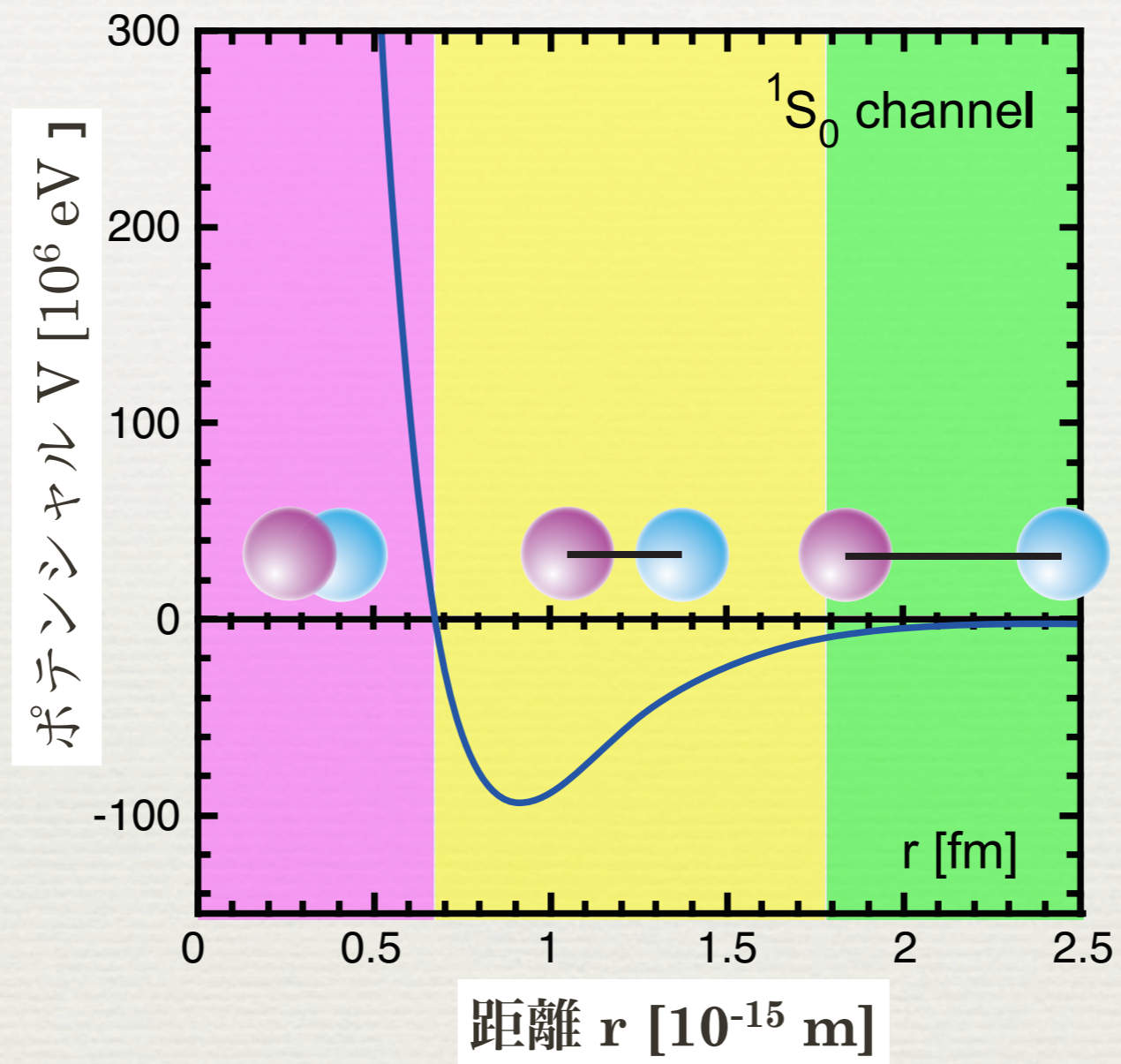
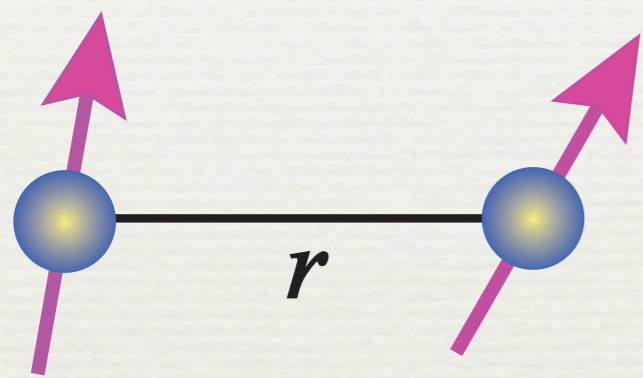
二体力(ポテンシャル)が確立



近距離：強い斥力芯

中間距離：引力

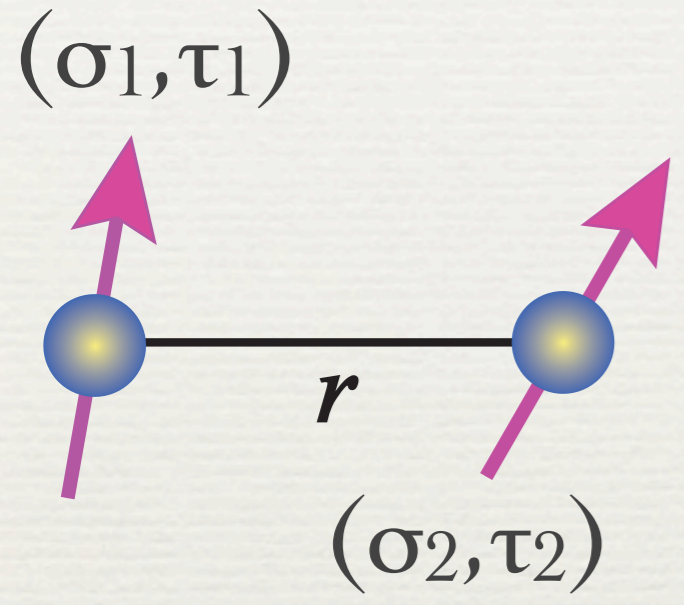
遠距離：弱い引力



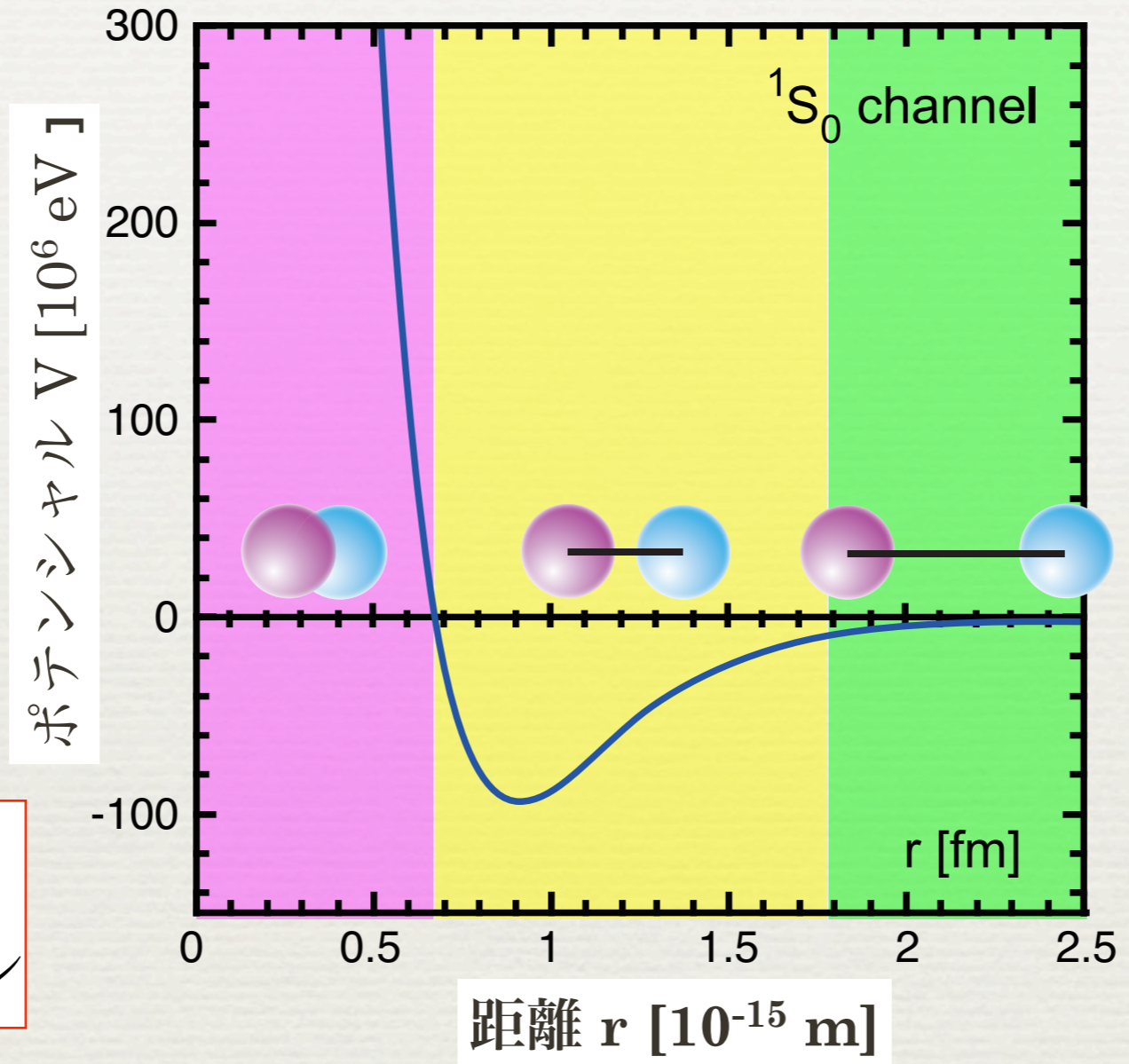
近距離：強い斥力芯

中間距離：引力

遠距離：弱い引力



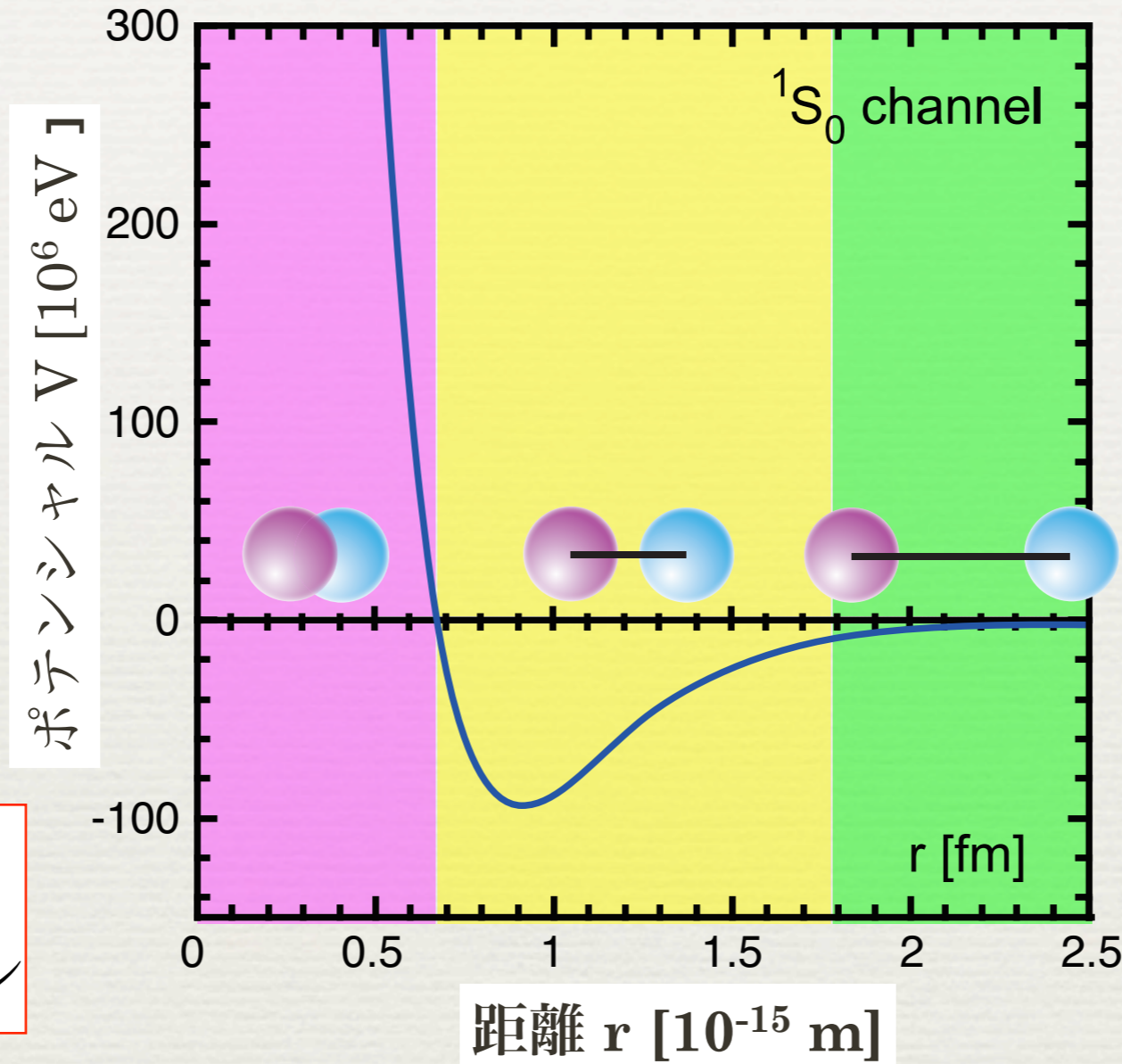
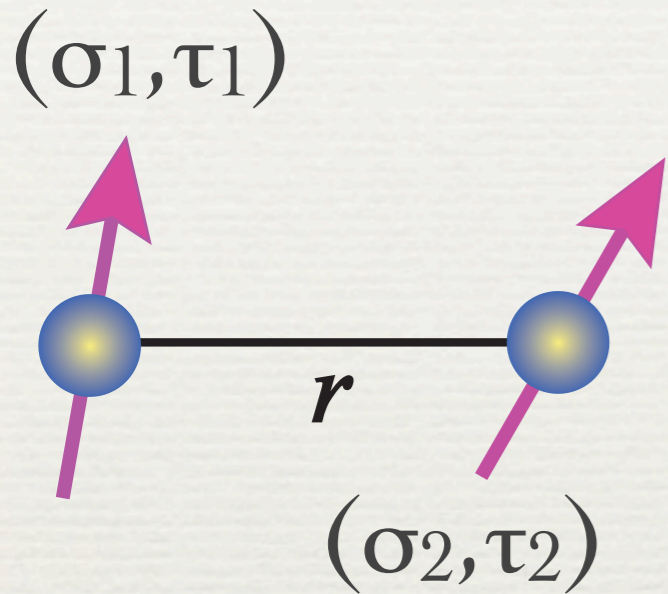
σ : 核子のスピン
 τ : 核子の荷電スピン



近距離：強い斥力芯

中間距離：引力

遠距離：弱い引力



σ : 核子のスピン
 τ : 核子の荷電スピン

$$= V_0(r) + V_\sigma(r) \sigma_1 \cdot \sigma_2 + V_\tau(r) \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{\sigma\tau}(r) (\sigma_1 \cdot \sigma_2) (\tau_1 \cdot \tau_2) + V_T S_{12} + V_{T\tau} S_{12} \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{LS} L \cdot S + V_{LS\tau} (L \cdot S) (\tau_1 \cdot \tau_2) + \dots$$

核力は “中心力 + スピン・荷電スピン力”

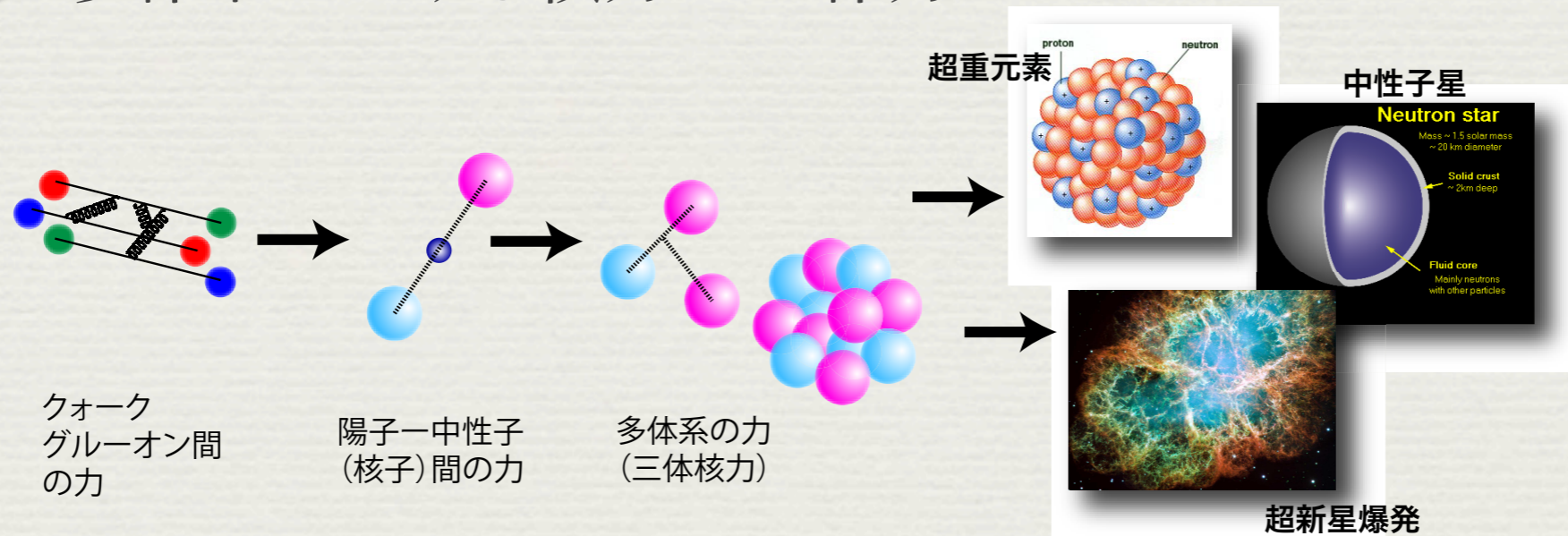
核 力 研究の拡がり

📌 4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二体力(二体核力)が確立される(1990年代)

📌 核力研究のフロンティア

📌 クォーク(素粒子)から核力を理解する

📌 多体系における核力: 三体力

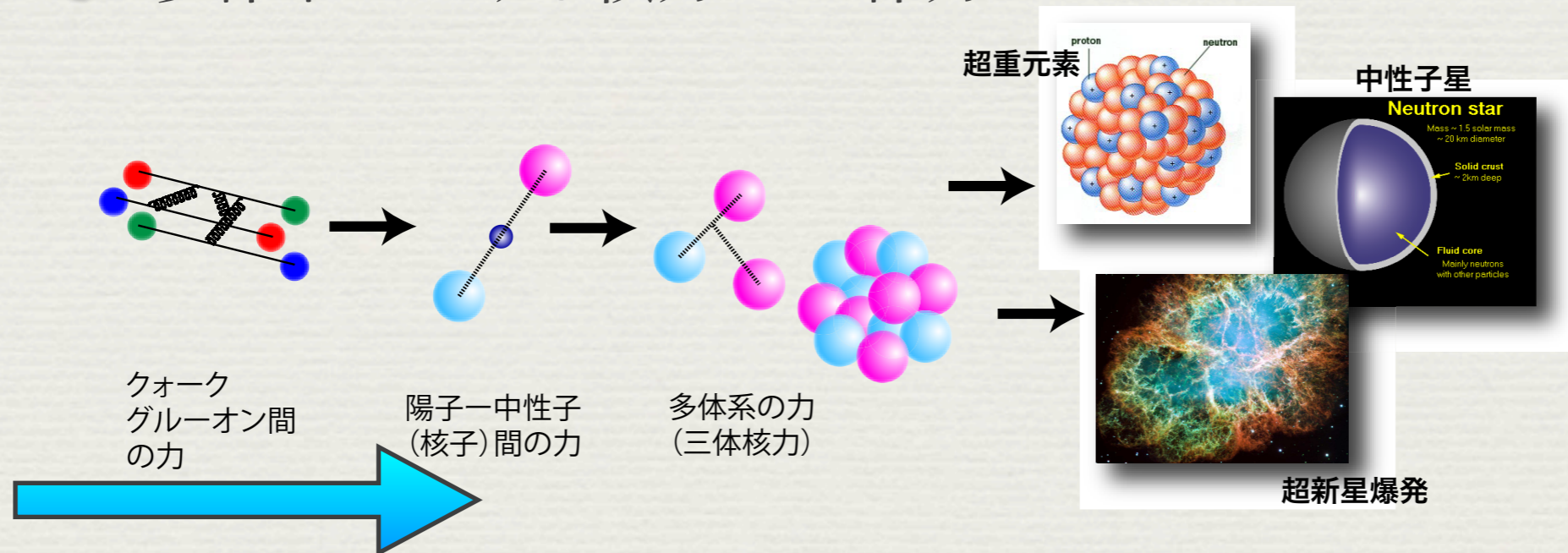


核 力 研究の拡がり

- 4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二体力(二体核力)が確立される(1990年代)
- 核力研究のフロンティア

クォーク(素粒子)から核力を理解する

多体系における核力：三体力

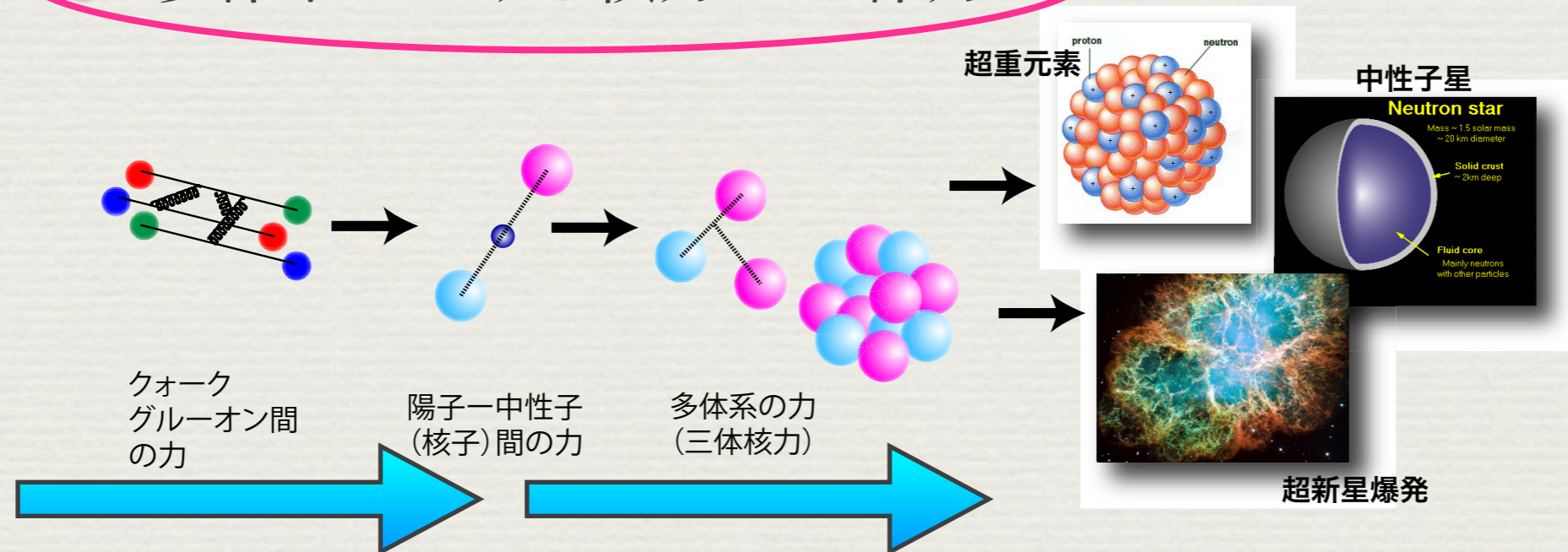


核 力 研究の拡がり

- 4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二体力(二体核力)が確立される(1990年代)
- 核力研究のフロンティア

クォーク(素粒子)から核力を理解する

多体系における核力: 三体力

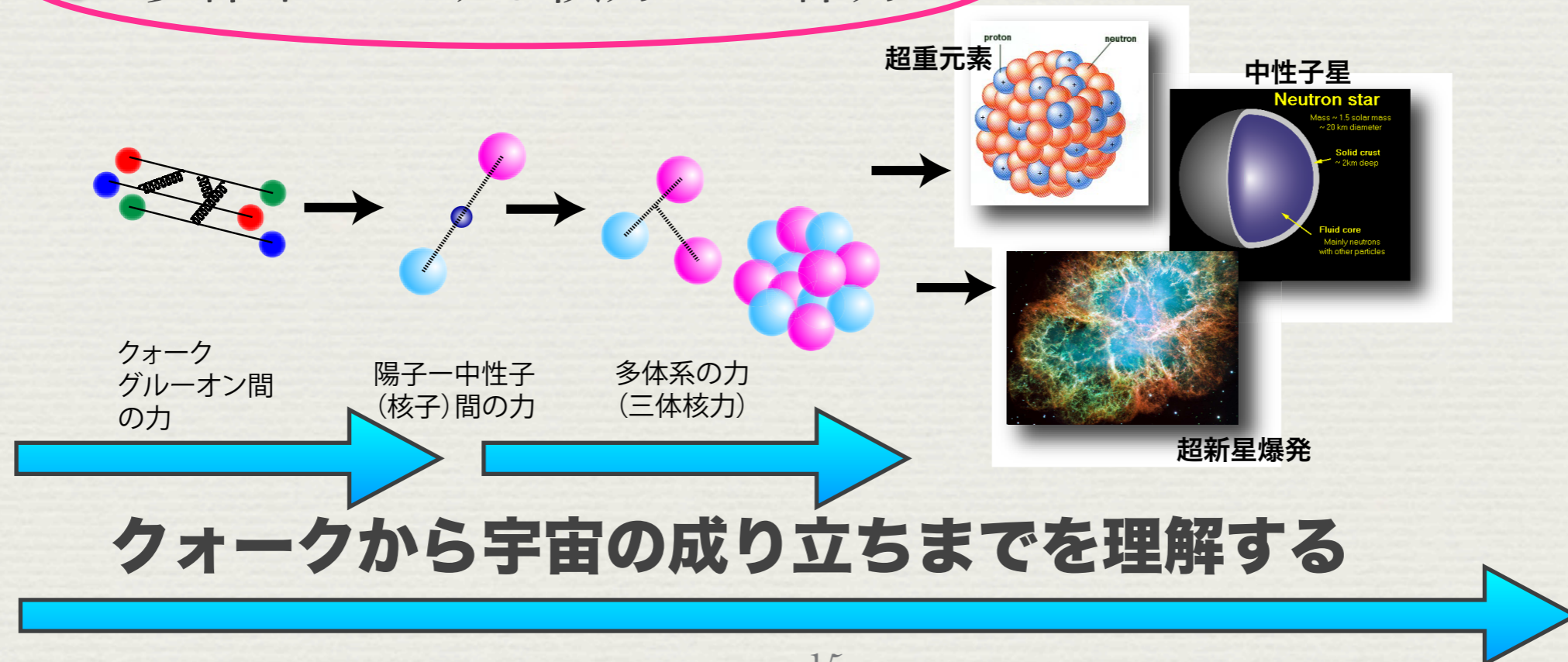


核 力 研究の拡がり

- 4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二体力(二体核力)が確立される (1990年代)
- 核力研究のフロンティア

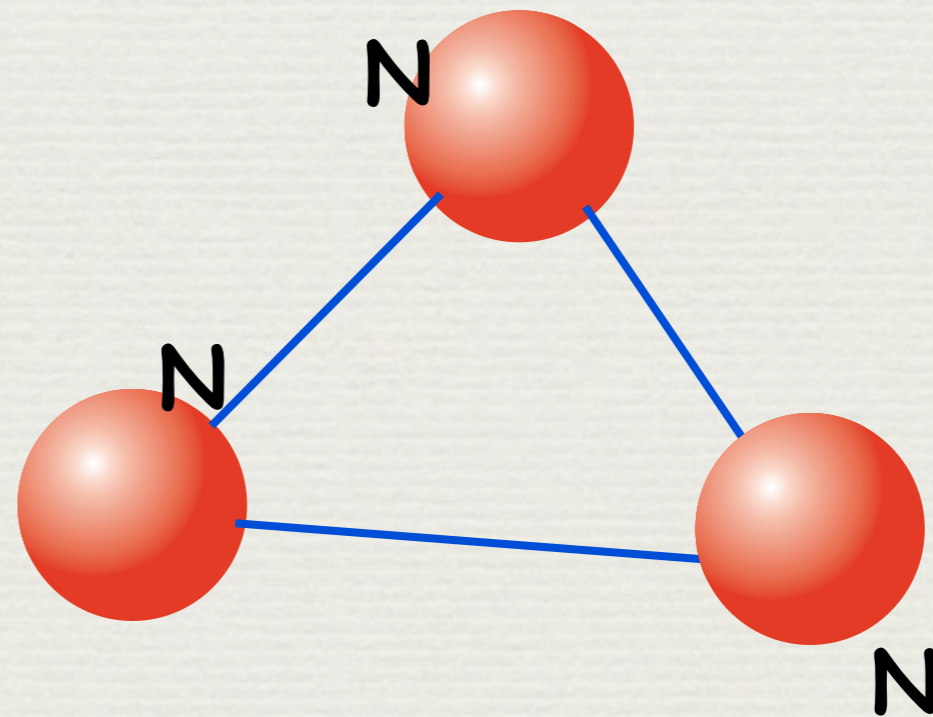
クォーク (素粒子) から核力を理解する

多体系における核力：三体力



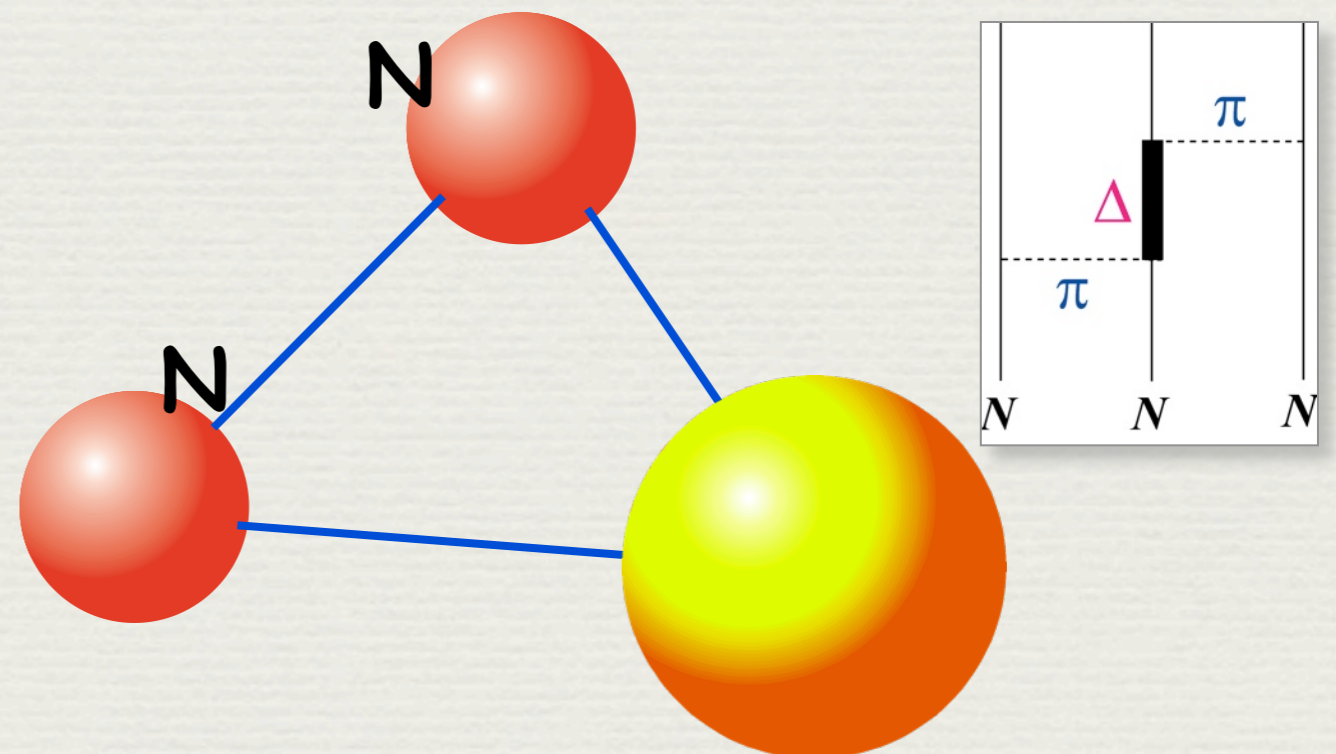
③ 体力(三体核力)とは

- ◆ 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体力 (三体核力) と呼ぶ。
- ◆ 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体力を予言。



③ 体力(三体核力)とは

- ◆ 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体力 (三体核力) と呼ぶ。
- ◆ 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体力を予言。

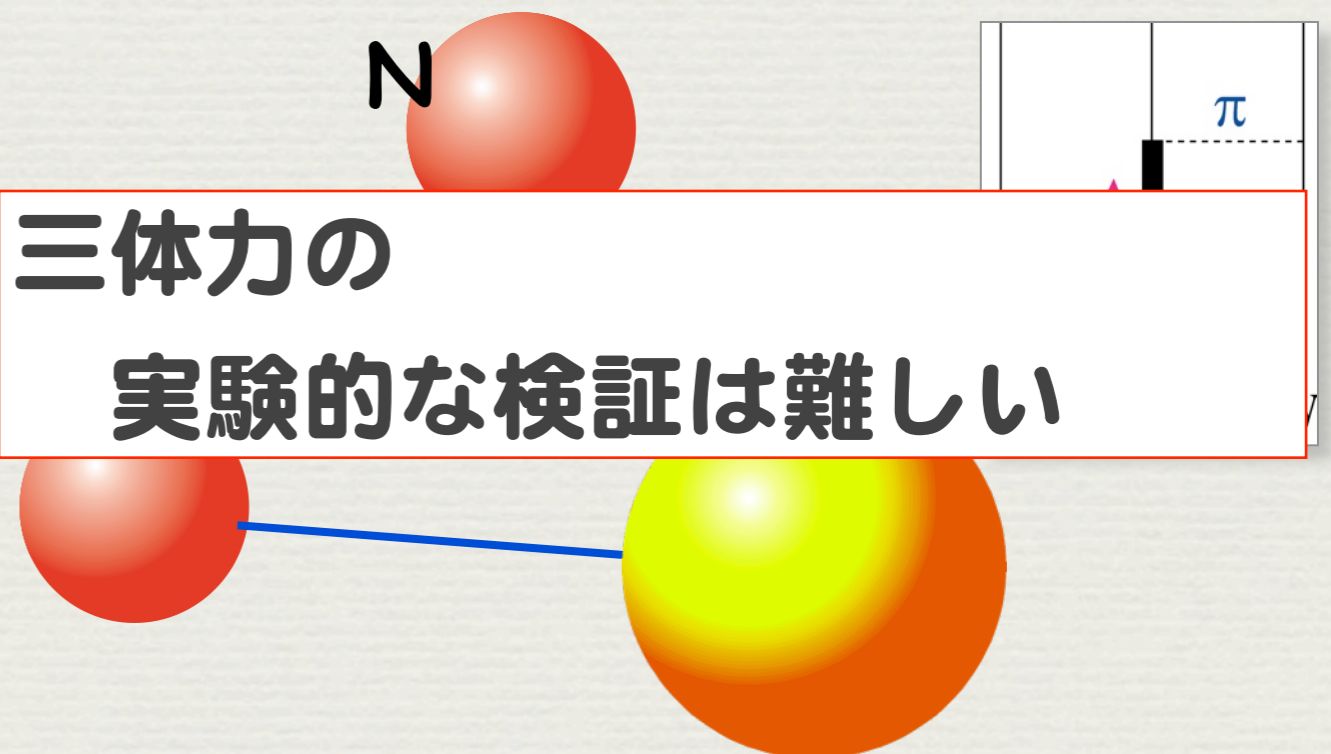


③ 体力(三体核力)とは

- ◆ 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体力 (三体核力) と呼ぶ。
- ◆ 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体力を予言。



三体力の
実験的な検証は難しい



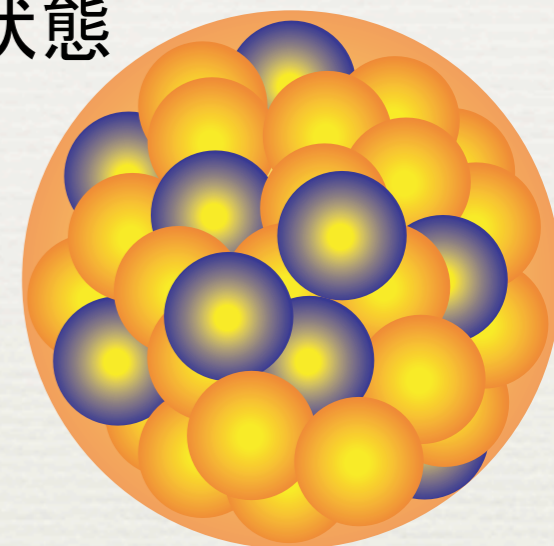
Δ : excited state of nucleon



📌 原子核：核子(陽子,中性子)が非常に狭い空間に密集した状態

📌 核力(原子核内の核子を結合させている力)：強い力

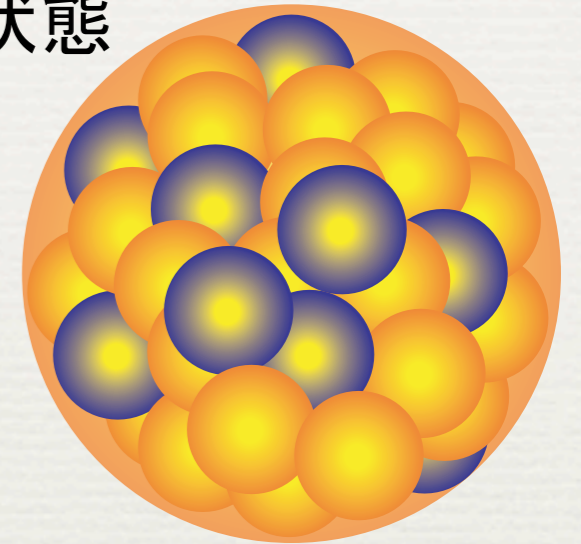
📌 三体力の効果はどこで、どのようにして現れるのか？



力(相互作用)	重力	電磁気力	弱い力	強い力
長さ	10^8 m	10^{-10} m	$< 10^{-15}$ m	$< 10^{-15}$ m
力の大きさ	10^{-38}	10^{-2}	10^{-5}	1
仮想粒子	(重力子)	光子	W, Z ボゾン	グルーオン, 中間子
	地球一月一衛星	原子・分子	原子核崩壊 ニュートリノ	原子核 クォーク

原子核に③体力はあるのか？

- 📌 原子核：核子(陽子,中性子)が非常に狭い空間に密集した状態
- 📌 核力(原子核内の核子を結合させている力)：強い力
- 📌 三体力の効果はどこで、どのようにして現れるのか？



力(相互作用)	重力	電磁気力	弱い力	強い力
長さ	10^8 m	10^{-10} m	$< 10^{-15}$ m	$< 10^{-15}$ m
力の大きさ	10^{-38}	10^{-2}	10^{-5}	1
仮想粒子	(重力子)	光子	W, Z ボゾン	グルーオン, 中間子
	地球一月一衛星	原子・分子	原子核崩壊 ニュートリノ	原子核 クォーク

Outline

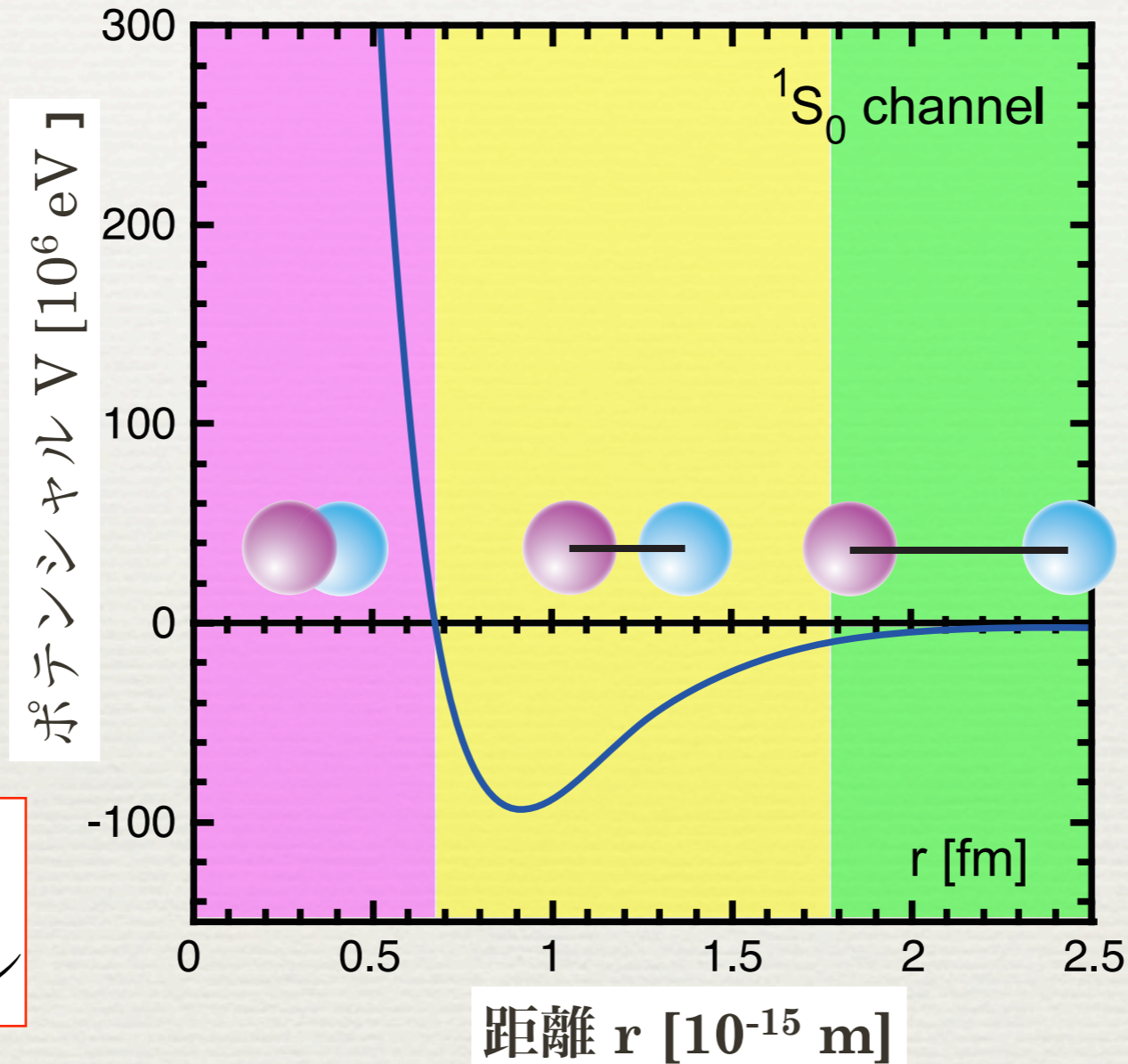
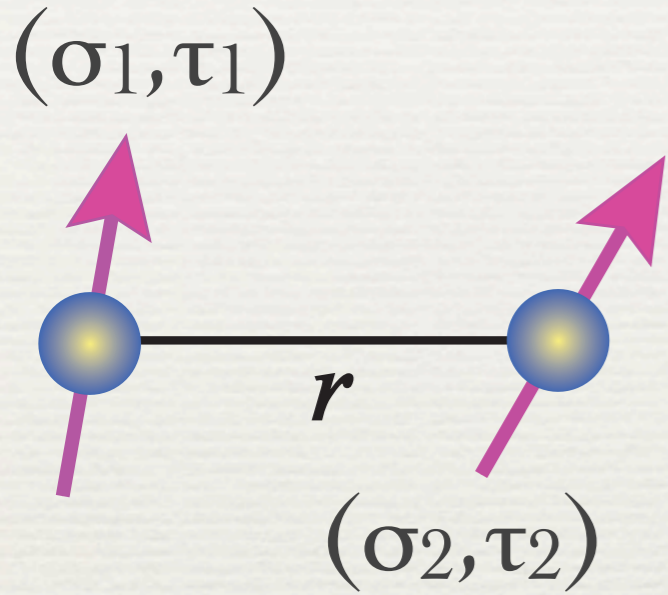
- ◆ Part 1
 - ◆ 導入
 - ◆ 核力研究(理論)
- ◆ Part 2
 - ◆ 核力研究(実験)
 - ◆ 三体核力
- ◆ Part 3
 - ◆ 重陽子-陽子散乱と三体核力
- ◆ Part 4
 - ◆ 三体核力研究の展望
 - ◆ 雑談

二体核力の研究 (理論)

近距離：強い斥力芯

中間距離：引力

遠距離：弱い引力



σ : 核子のスピン
 τ : 核子の荷電スピン

$$= V_0(r) + V_\sigma(r) \sigma_1 \cdot \sigma_2 + V_\tau(r) \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{\sigma\tau}(r) (\sigma_1 \cdot \sigma_2) (\tau_1 \cdot \tau_2) + V_T S_{12} + V_{T\tau} S_{12} \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{LS} L \cdot S + V_{LS\tau} (L \cdot S) (\tau_1 \cdot \tau_2) + \dots$$

核力は “中心力 + スピン・荷電スピン力”

核力の特徴

1. 核力の到達距離は有限 (finite range)。
2. 核力は中間領域で引力となる
(attractive at intermediate range)。
3. 核力は斥力芯 (hard core) を持つ。
4. 核力は、スピン量子数依存性を持つ
(Spin-dependent non-central force)。
 - ・ テンソル力, スピン軌道力
5. 荷電独立性(charge independence)。

1. 核力の到達距離は有限。

湯川の中間子交換理論では、核力は

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r}$$

g : 核子と π 中間子の結合定数

と書ける。

核力の到達距離 λ は、

$$\lambda \equiv \frac{\hbar}{m} \equiv \frac{1}{\mu}$$

これは、質量 m をもった粒子の存在を示唆。

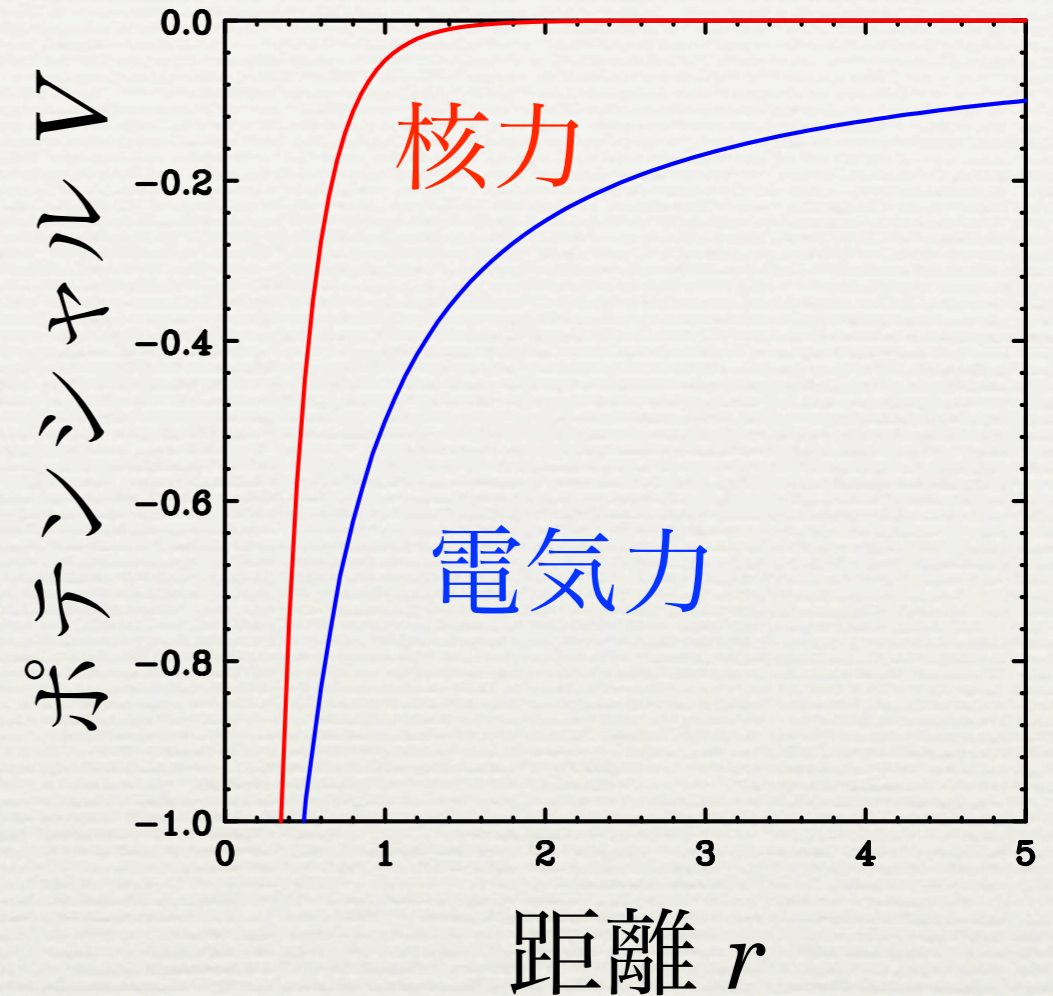
$m_\pi = 140 \text{ MeV}/c^2$ より、

$$\lambda = 1.4 \text{ fm}$$

結合定数 g は、重陽子の結合エネルギー、

4重極モーメント、核子-核子散乱のデータより

$$\frac{g^2}{\hbar c} = 0.28$$



c.f. クーロン力の到達距離は無限。

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}$$

電子と電場の結合定数

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.0}$$

2. 核力は中間領域で引力となる。

3. 核力は斥力芯をもつ。

- 予言：Wigner (1933)

${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^4\text{He}$ の束縛エネルギーから、核力の到達距離は 1-2 fm であり、非常に強い力が働いている。

- 原子核の結合エネルギー

原子核を結合させる力は平均して引力的。

同時に、

原子核の飽和性

原子核の大きさに寄らず一定の数密度 ρ_0 を持つ。

対称核物質 ($N=Z$) では、1 核子当たりのエネルギー $\mathcal{E}(\rho) \equiv E/A$ は、極小値を持つ。

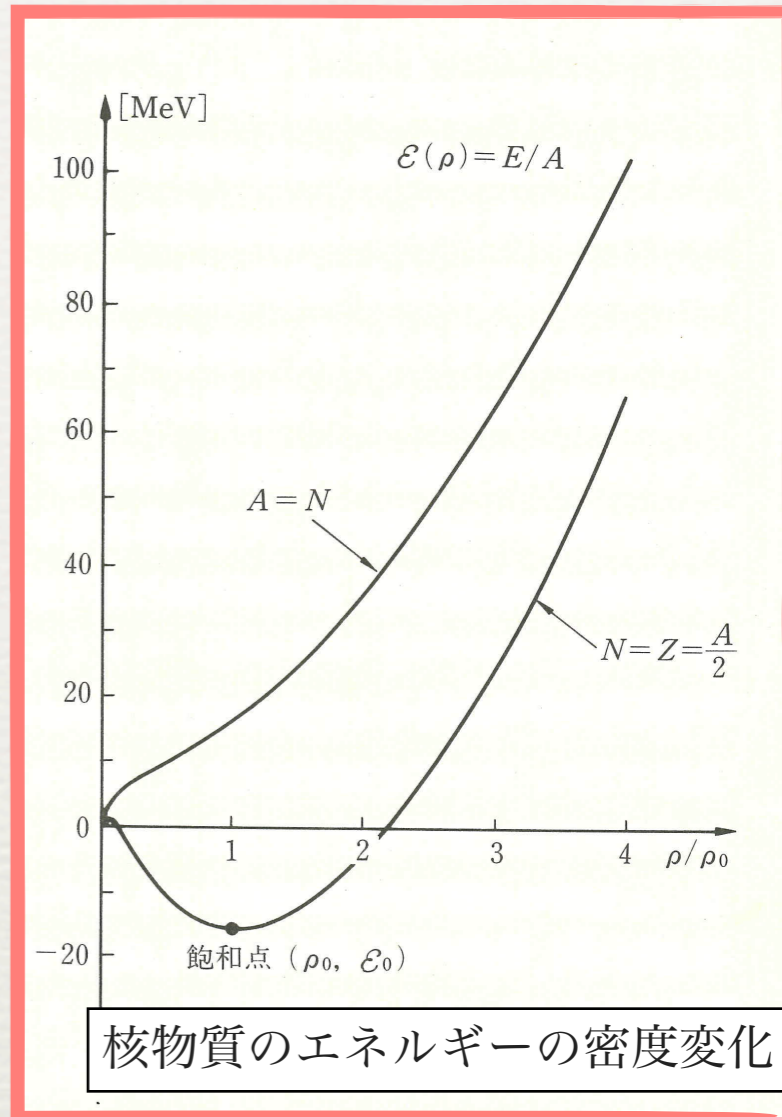
安定な原子核の半径は $R = r_0 A^{1/3}$ ($r_0 \sim 1.1$ fm)

より、
$$\rho_0 = \frac{A}{(4\pi R^3/3)} = \left(\frac{4\pi}{3} r_0^3\right)^{-1} \sim 0.17 \text{ fm}^{-3}$$

また、 $\mathcal{E}_0 \equiv \mathcal{E}(\rho_0) = -16 \pm 1 \text{ MeV}$

斥力芯の存在も示唆

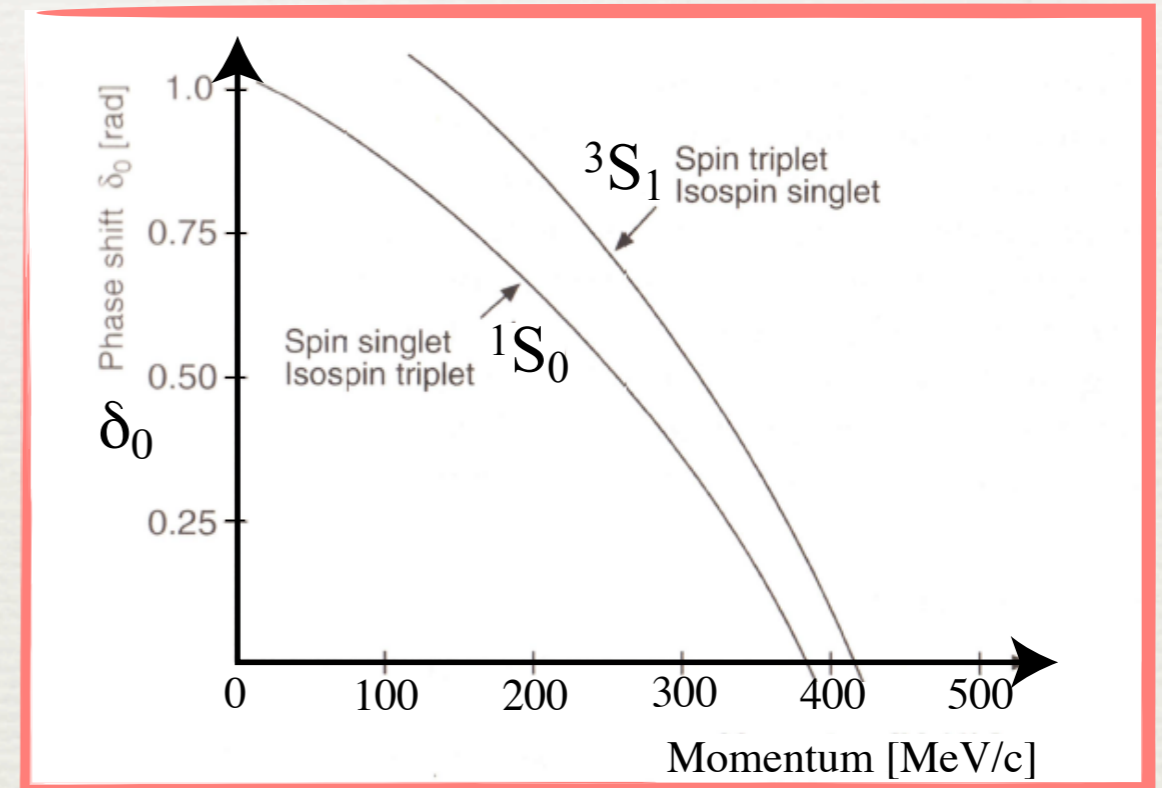
引力のみでは、原子核は密度が高い程結合エネルギーが大きくなり、超高密度領域ではつぶれてしまう。



2. 核力は中間領域で引力となる。
3. 核力は斥力芯をもつ。

位相差解析

1S_0 は約 $E_{\text{lab.}}=250 \text{ MeV}$ で符号が変わる
ある



補足

微分断面積と散乱振幅 $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$

散乱振幅を部分波に分解すると

$$f(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{i\delta_l} \sin(\delta_l) P_l(\cos \theta)$$

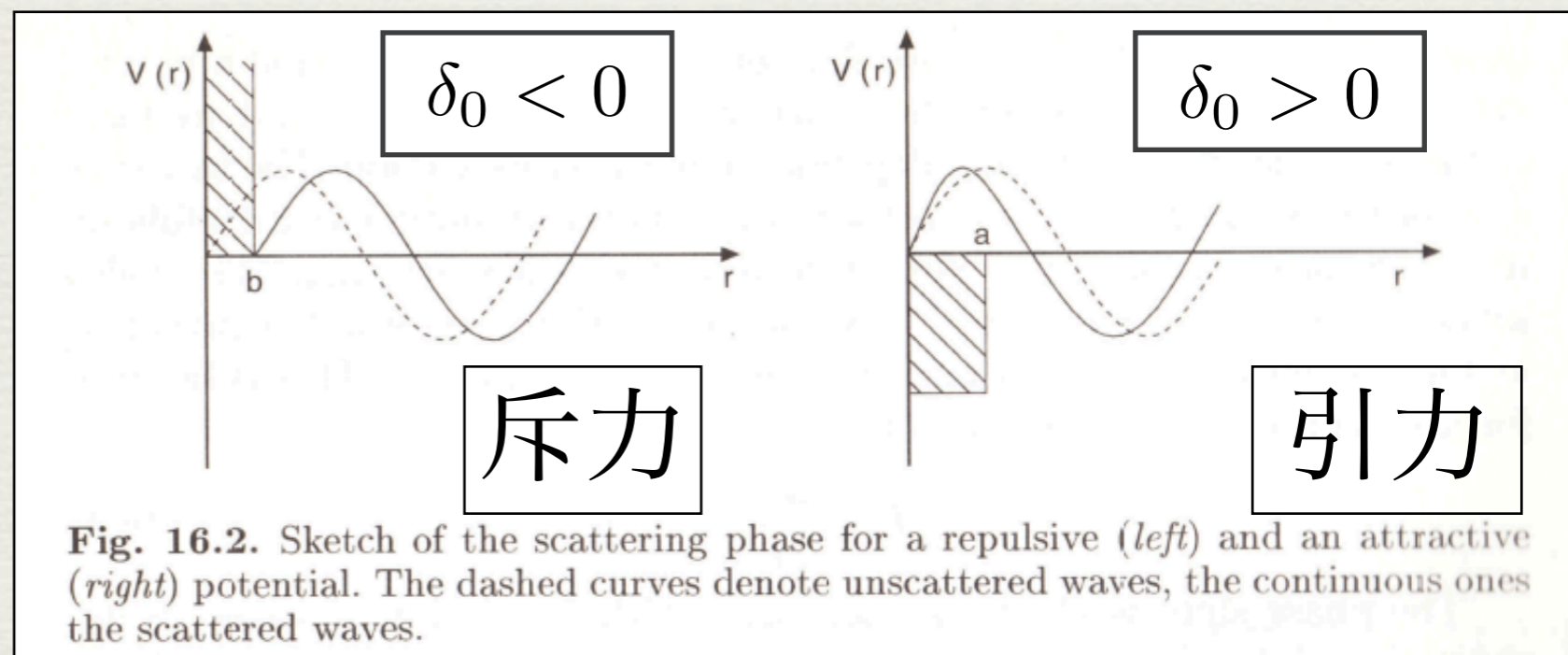
核子間距離 a の時の角運動量 l は

$$l \leq \frac{|\mathbf{p}| \cdot a}{\hbar}$$

と考えられる。

ポテンシャルの到達距離 a が約2 fm と考えると、 $p < 100 \text{ MeV}/c$ では、 $l=0$ が主成分(S波)。

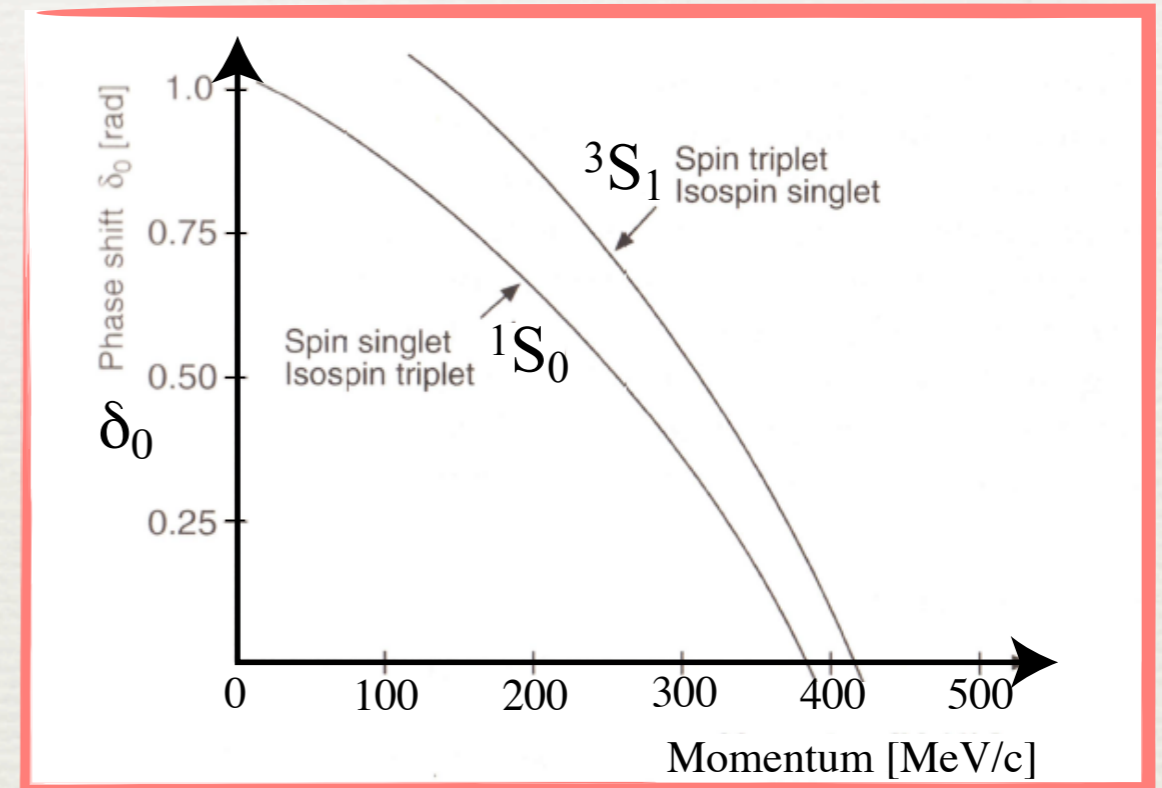
$l=0$ の時の部分波は、右図の様に δ_0 による正弦波のズレを考えればよい。



2. 核力は中間領域で引力となる。
3. 核力は斥力芯をもつ。

位相差解析

1S_0 は約 $E_{\text{lab.}}=250 \text{ MeV}$ で符号が変わる
ある

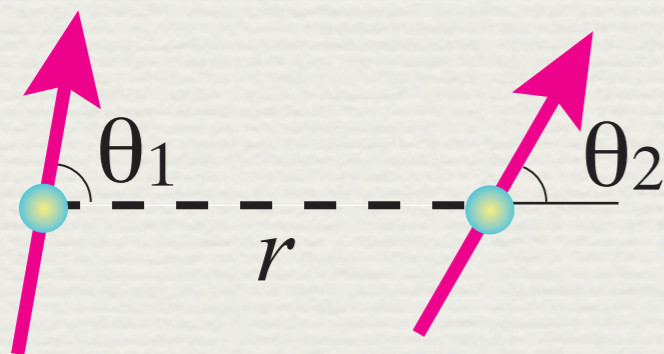


4. 核力はスピン量子数依存性を持つ

- ◆ テンソル力：

- ◆ 核子のスピンの方向と相対座標との間の角度に依存するポテンシャル

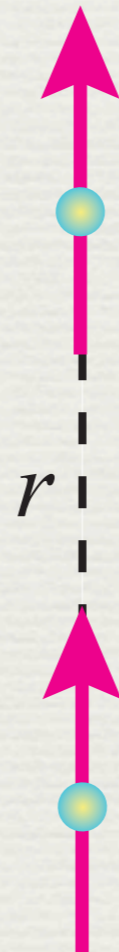
$$\begin{aligned} V_{\text{tensor}} &\equiv (-S_{12}) \\ &= -3 (\vec{\sigma}_1 \cdot \hat{r}) (\vec{\sigma}_2 \cdot \hat{r}) + \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 \end{aligned}$$



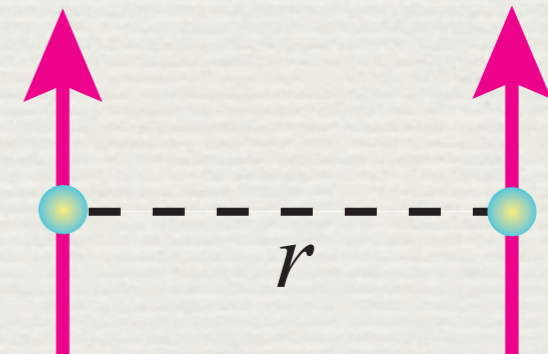
一般形

r, θ_1, θ_2 の関数

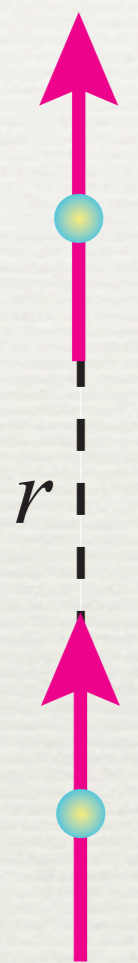
引力



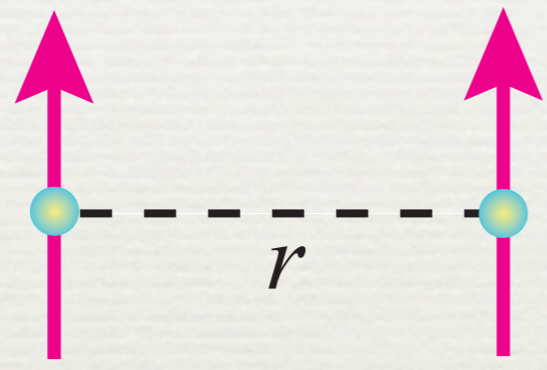
斥力



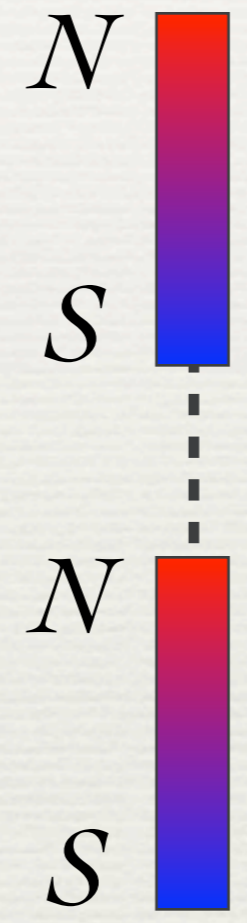
◆ テンソル力 (続き)



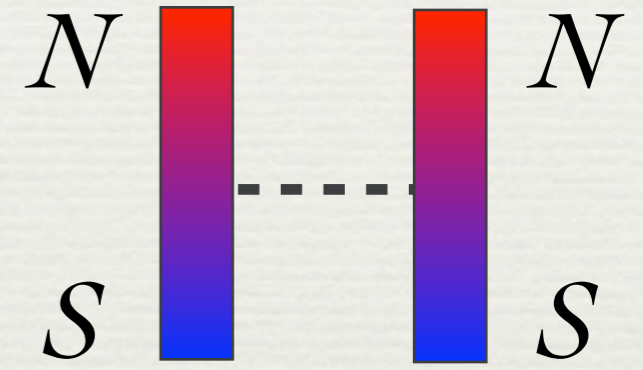
引力



斥力



引力



斥力

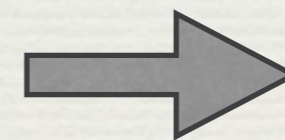
◆ テンソル力 (続き)

テンソル力が顕著に見えるのは、

1. 重陽子

D波に寄与

- 電気四重極モーメント $Q \neq 0$
 - 磁気モーメント $\mu_p + \mu_n \neq \mu_d$
 - D/S 比
- } 3S_1 以外に
} 3D_1 状態が混合



テンソル力
(非中心力)

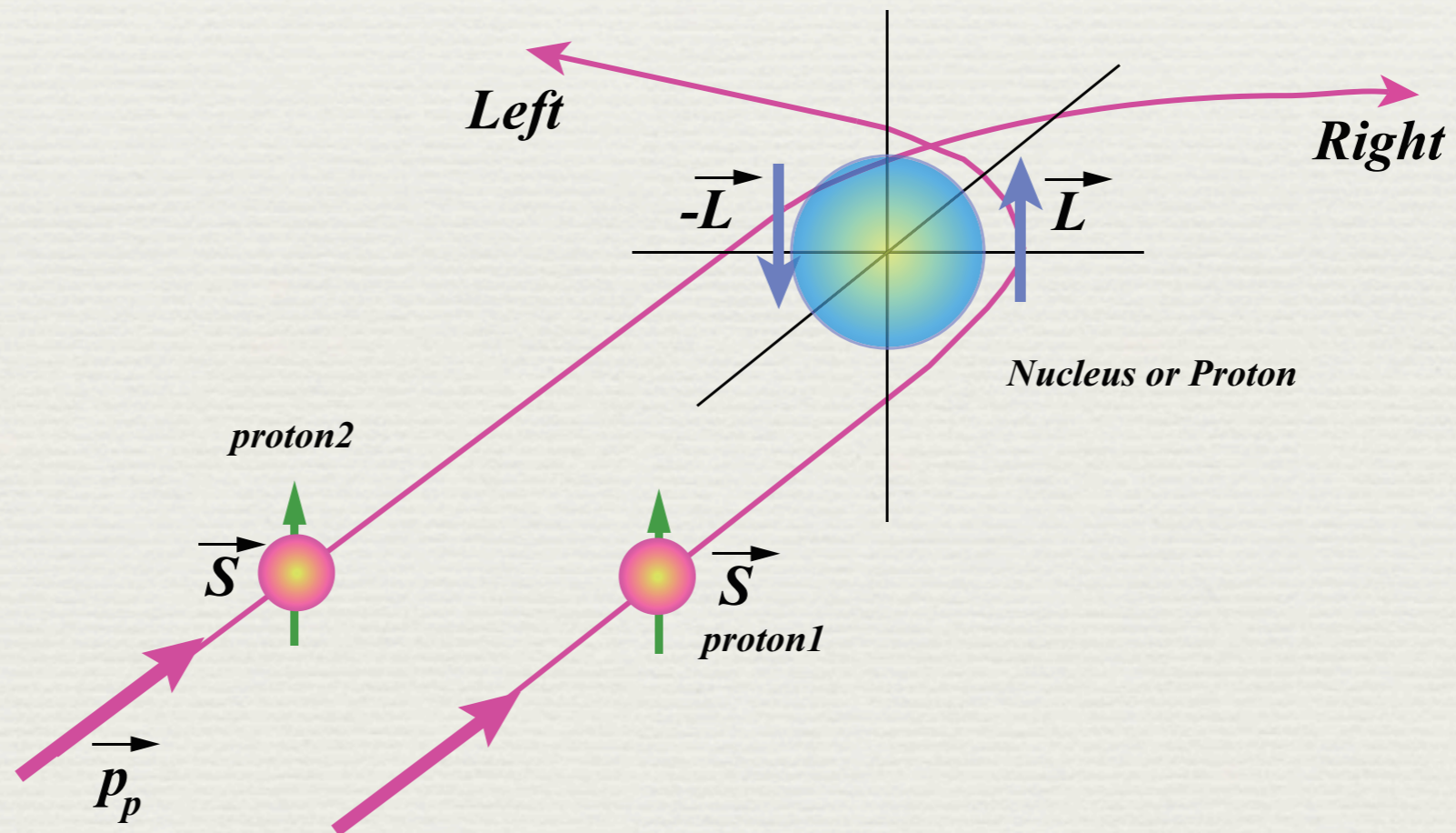
2. NN 散乱の散乱振幅

mixing parameter ε

4. 核力はスピン量子数依存性を持つ

◆ スピン・軌道力

$$V_{LS} = \vec{L} \cdot \vec{S}$$



◆ スピン・軌道力(続き)

P波($l=1$)の部分波

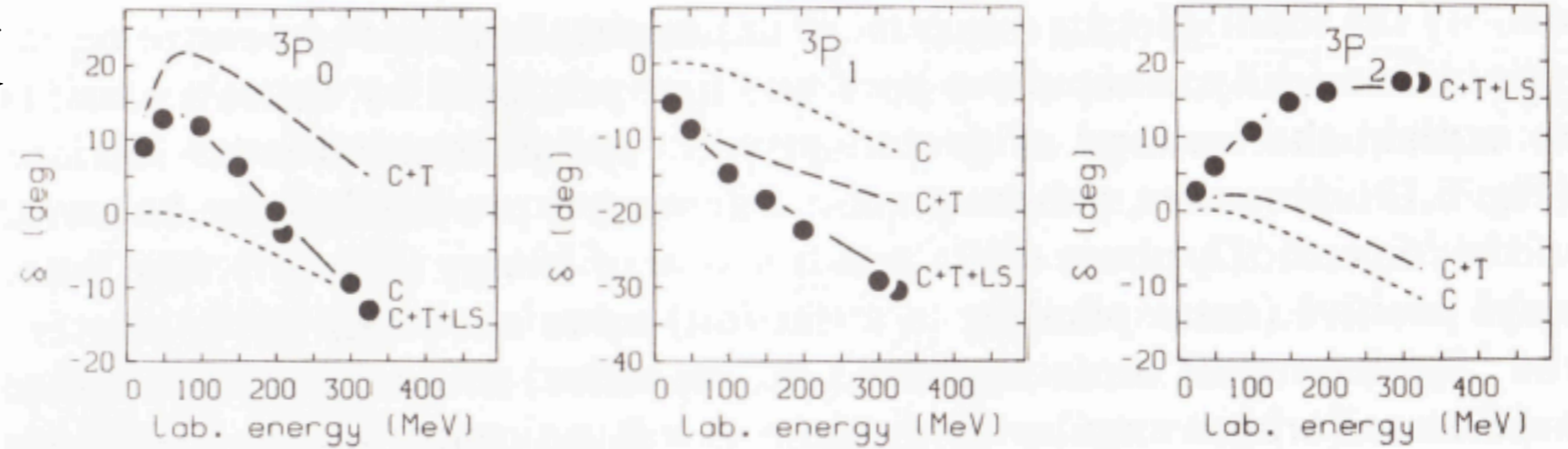
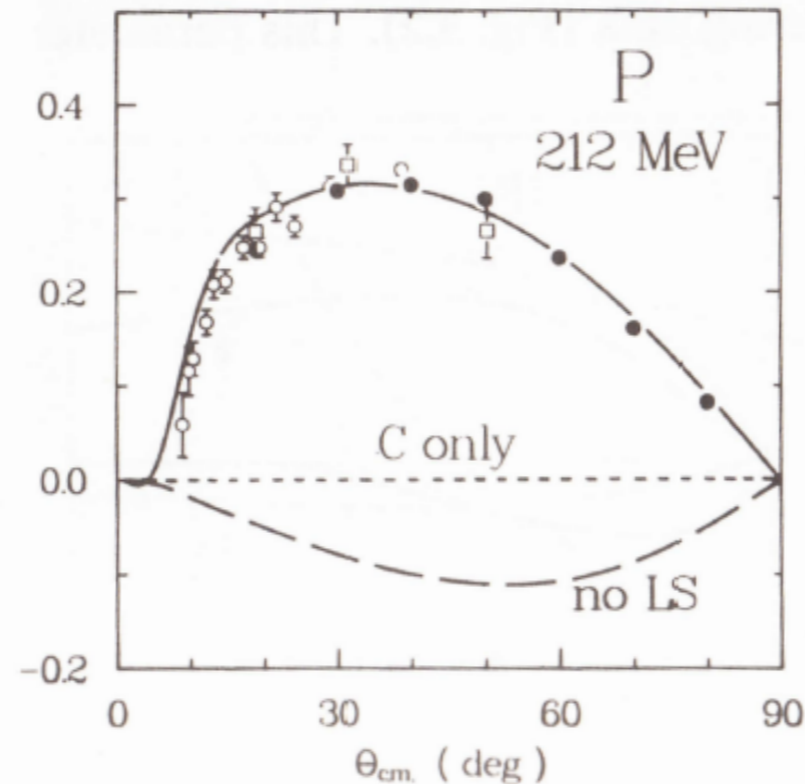


Fig. 3.3. NN phase shifts in triplet P waves. Shown are predictions using a central force only (C), central plus tensor (C + T), and central plus tensor plus spin-orbit force (C + T + LS). The dots represent energy-independent phase shift analyses (Arn+ 83, Dub+ 82).

ベクトル偏極量



5. 荷電独立性(charge independence)

pp , nn , pn 間に働く力は同じか？

pp 力 = nn 力：荷電対称性 (charge symmetry)

pp/nn 力 = pn 力：荷電独立性 (charge independence)

は、ほぼ成り立っている。

散乱長 a 低エネルギーNN散乱において、
S波の散乱位相差のエネルギー依存から得られる。 $k \cot \delta(E) = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2}r_e k^2 - Pr_e^3 k^4$

$$a_{pp} = -17.3 \pm 0.4 \text{ fm}$$

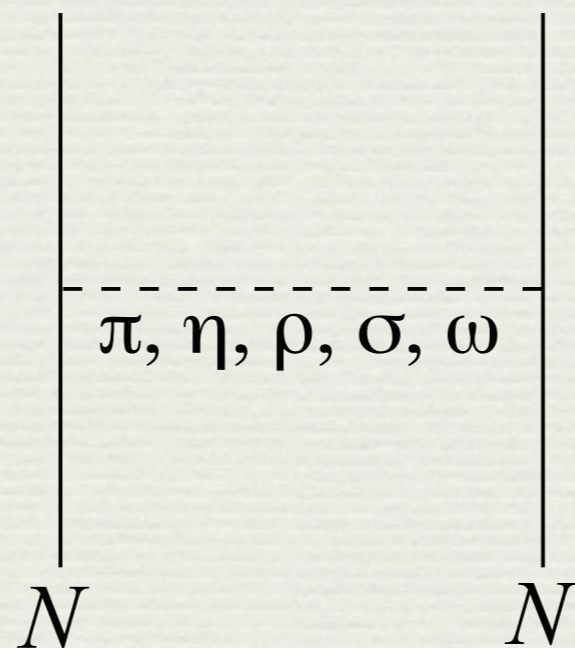
$$a_{nn} = -18.8 \pm 0.5 \text{ fm}$$

$$a_{pn} = -23.74 \pm 0.02 \text{ fm}$$

荷電独立性の破れ(charge independence breaking)が見られる。

Bonn Potential で導入されている中間子

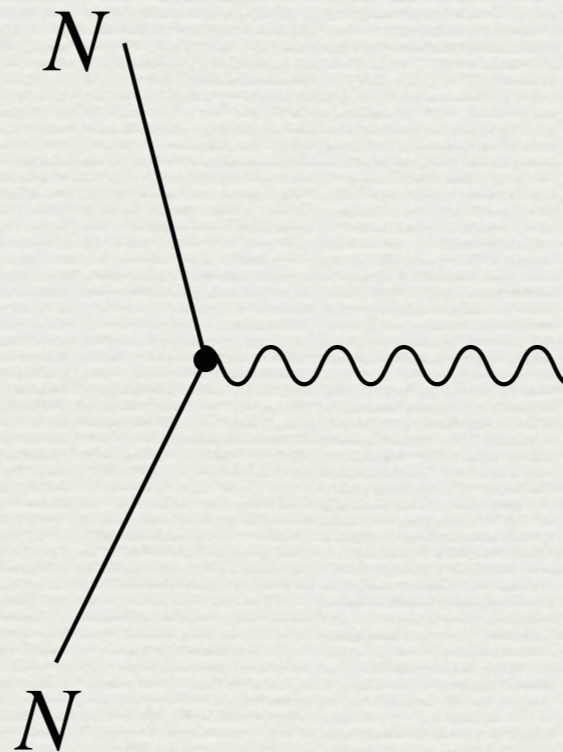
	Mass (MeV)	Spin·Parity (J^P)	Isospin	Width/Life
π^\pm	139.57018 ± 0.00035	0^- (Pseudo Scalar)	1	
π^0	134.9766 ± 0.0006	0^- (Pseudo Scalar)	1	
η	547.75 ± 0.12	0^- (Pseudo Scalar)	0	1.29 [keV]
σ	400 ~ 600	0^+ (Scalar)	0	300 ~ 500 [MeV]
$\rho(770)$	775.8 ± 0.5	1^- (Vector)	1	150.3 ± 1.6 [MeV]
$\omega(782)$	782 ± 0.1	1^- (Vector)	0	9.9 [MeV]
p	938.2796	$\frac{1}{2}^+$	$\frac{1}{2}$	stable
n	939.5731	$\frac{1}{2}^+$	$\frac{1}{2}$	925(11) [s]



NN Potential の導き方 (minimum)

～Bonn ポテンシャルの場合～

- ◆ 場の理論に基づいて、核子-中間子相互作用の Lagrangian を導く。
- ◆ 求めた Lagrangian を用いて、各中間子交換に関する ファインマンダイアグラムを記述する。



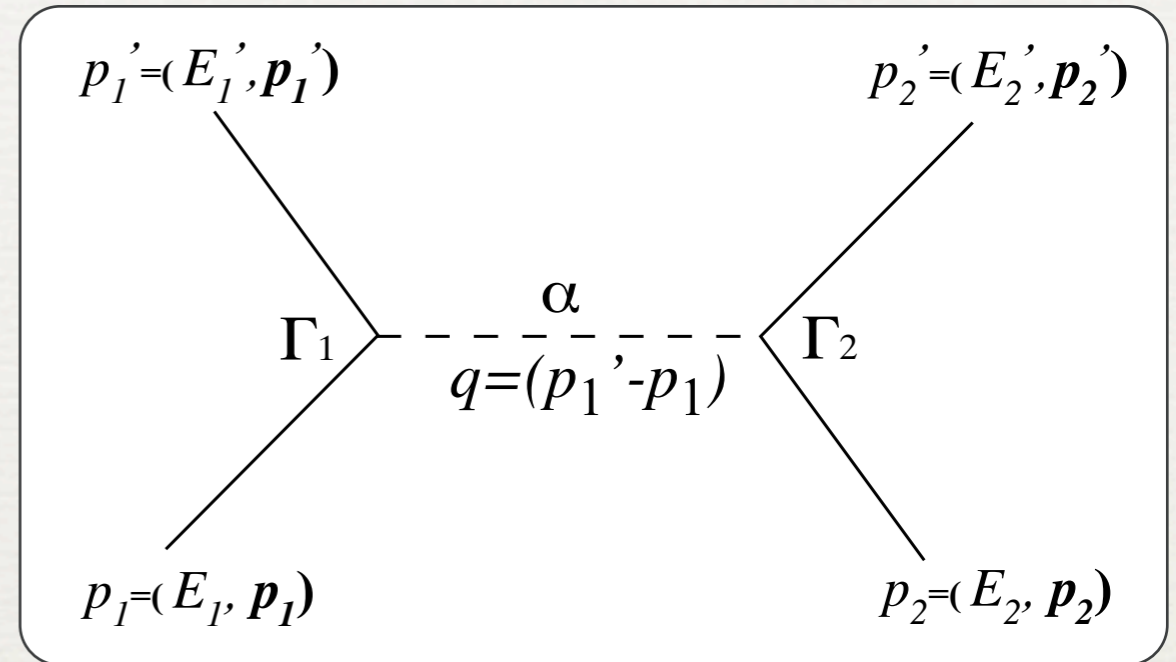
π 中間子交換の場合

OBERのファインマンダイアグラム

$$\frac{\bar{u}_1(p'_1)\Gamma_1 u_1(p_1) P_\alpha \bar{u}_2(p'_2)\Gamma_2 u_2(p_2)}{(p'_1 - p_1)^2 - m_\alpha^2}$$

$u(p)$: Dirac spinor

$\frac{P_\alpha}{(p'_1 - p_1)^2 - m_\alpha^2}$: Meson Propagator



π NNのLagrangian

$$\mathcal{L}_{\pi NN} = -\frac{f_{\pi NN}}{m_\pi} \bar{\psi} \gamma_5 \gamma_\mu \tau \psi \cdot \partial^\mu \phi_\pi \longrightarrow \Gamma$$

π 中間子交換のポテンシャル

$$V_\pi = \frac{f_\pi^2}{m_\pi^2} \frac{\bar{u}(p'_1) \gamma_5 \gamma_\mu (p_1 - p'_1)^\mu u(p_1) \bar{u}(p'_2) \gamma_5 \gamma_\nu (p_2 - p'_2)^\nu u(p_2)}{(p_1 - p'_1)^2 - m_\pi^2} \tau_1 \cdot \tau_2$$

重心系; 非相対論の極限をとると

$$V_\pi = \frac{f_\pi^2}{3m_\pi^2} \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}^2 + m_\pi^2} \left[-\sigma_1 \cdot \sigma_2 - S_{12}(\hat{\mathbf{k}}) \right] \tau_1 \cdot \tau_2$$

$$(p_1 - p'_1)^2 = -\mathbf{k}^2$$

各々の中間子の役割

$\pi(138)$

$$V_{\pi} = \frac{f_{\pi}^2}{3m_{\pi}^2} \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}^2 + m_{\pi}^2} \left[-\sigma_1 \cdot \sigma_2 - S_{12}(\hat{\mathbf{k}}) \right] \tau_1 \cdot \tau_2$$

遠距離力
テンソル力

$\sigma(600)$

$$V_{\sigma} = g_{\sigma}^2 \frac{1}{\mathbf{k}^2 + m_{\sigma}^2} \left(-1 + \frac{\mathbf{q}^2}{2M_N^2} - \frac{\mathbf{k}^2}{8M_N^2} - \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}}{2M_N^2} \right)$$

中間距離
引力の中心力、LS 力

$\omega(782)$

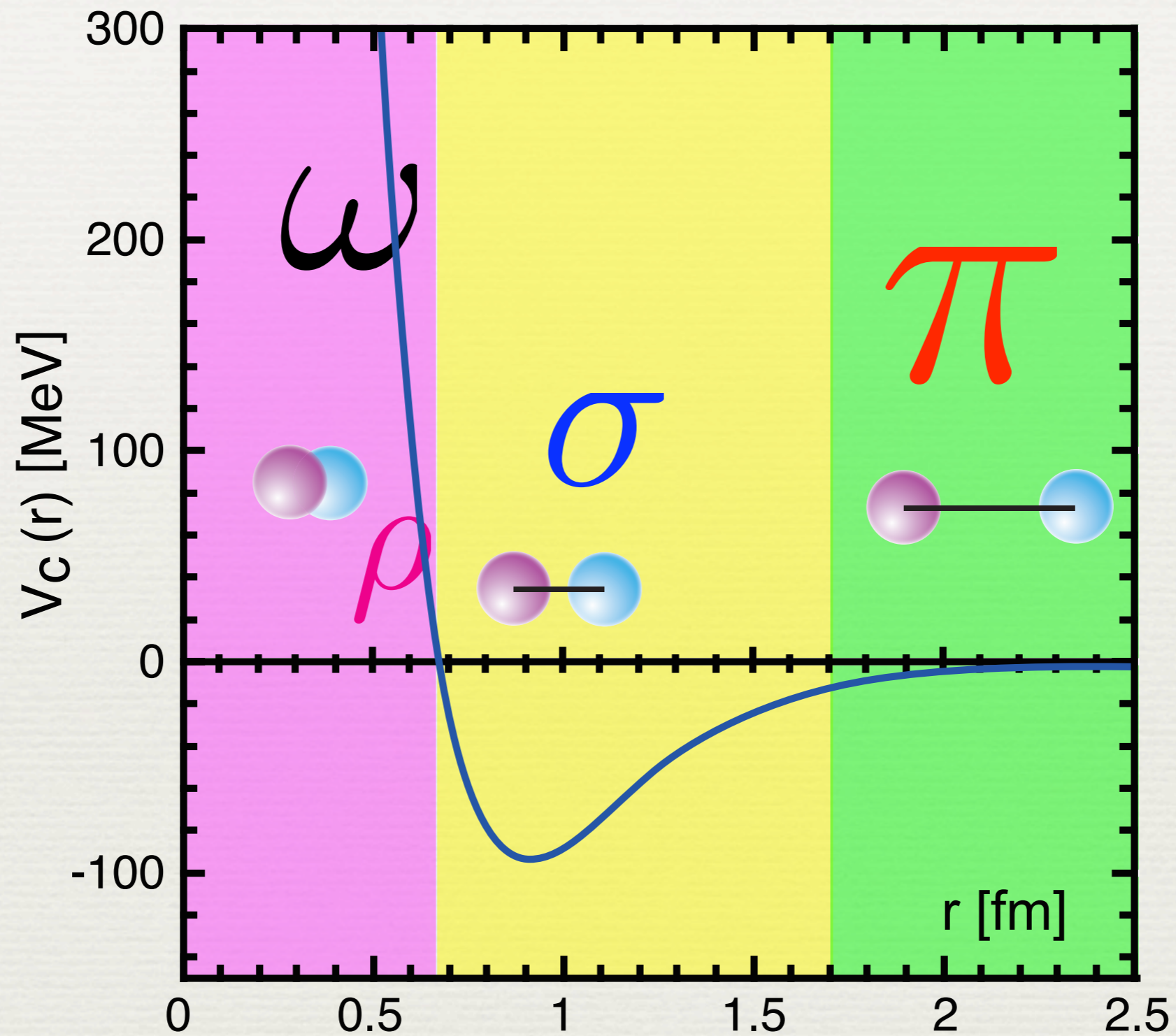
$$V_{\omega} = g_{\omega}^2 \frac{1}{\mathbf{k}^2 + m_{\omega}^2} \left(1 - 3 \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}}{2M_N^2} \right)$$

近距離
斥力の中心力、強いLS力

$\rho(770)$

$$V_{\rho} = \frac{f_{\rho}^2}{12M^2} \frac{\mathbf{k}^2}{\mathbf{k}^2 + m_{\rho}^2} \left(-2\sigma_1\sigma_2 + S_{12}(\hat{\mathbf{k}}) \right) \tau_1\tau_2$$

近距離のテンソル力
 π とは符号が逆



距離 r [fm]

現実的な核力ポテンシャル

- 1990年代、4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二核子間ポテンシャル(二体力)が登場。
- その様なポテンシャルを”現実的な核力ポテンシャル”と呼ぶ。
 - CD Bonn : R. Machleidt, Phys. Rev. C **63**, 024001 (2001)
 - Argonne V_{18} : R.B. Wiringa et al., Phys. Rev. C **51**, 38 (1995)
 - Nijmegen I, II : V.G.J. Stoks et al., Phys. Rev. C **49**, 2950 (1994)

	CD-Bonn	AV_{18}	Nijm I	Nijm II	Exp.
Character	Nonlocal	Local	Nonlocal	Local	
<i>NN</i> Scattering Data					
N_{data}	3058	4301	4301	4301	
χ^2/datum	1.03	1.09	1.03	1.03	
Deuteron Properties					
Quadr. moment [fm^2]	0.270	0.270	0.2719	0.2707	0.2859(3)
Asymptotic D/S state	0.0255	0.0250	0.0253	0.0252	0.0256(4)
D-state probab. [%]	4.83	5.76	5.664	5.635	

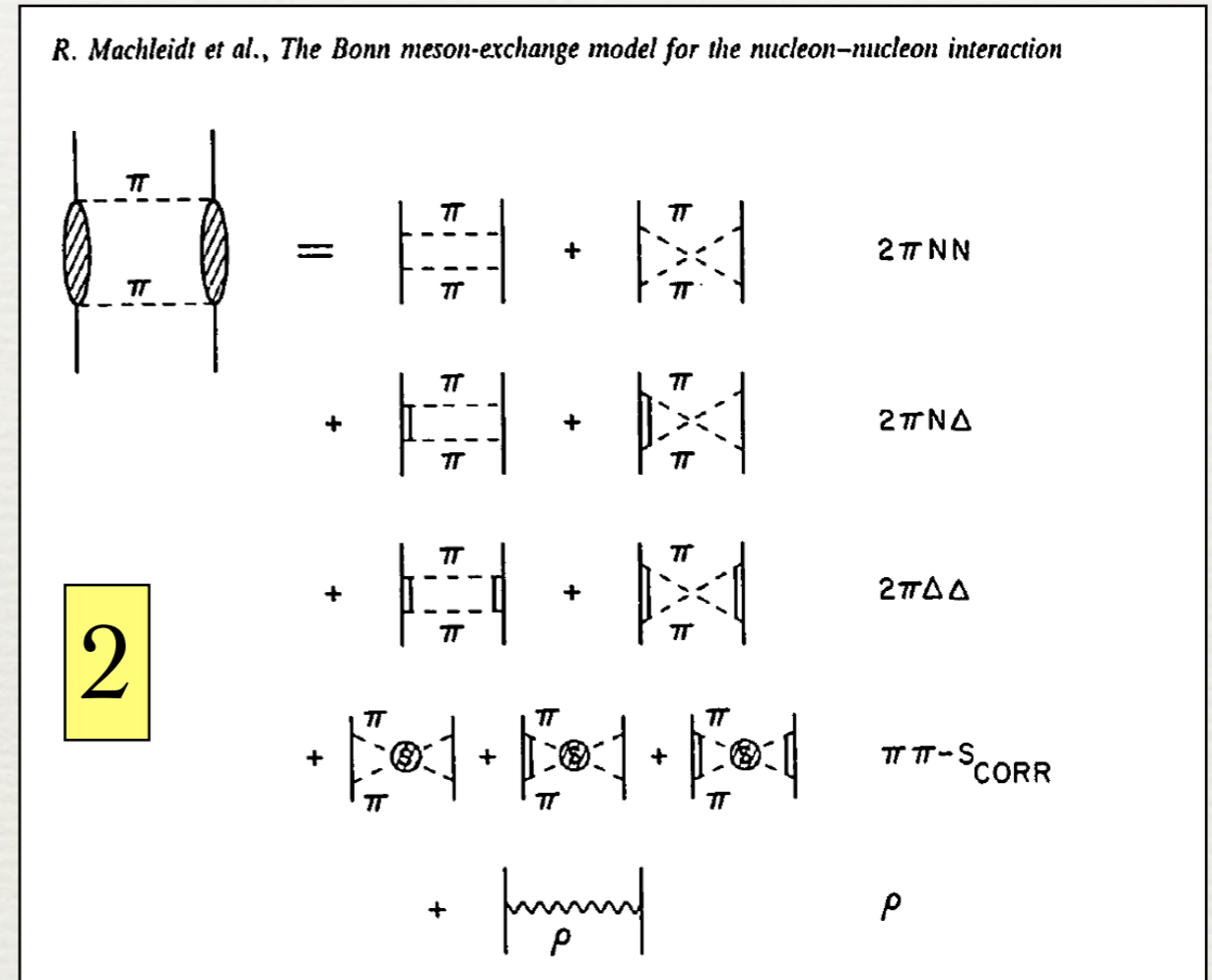
Bonn Potential

◆ Bonn Potential

R. Machleidt et al., Phys. Rep. 149, 1 (1987)

- ◆ 場の理論に基づき、OBEPを出発点として高次項を取り入れる。

1. $1\pi, \rho, \sigma, \omega$ 交換
2. 2π 交換
3. $\pi\rho, 3\pi, 4\pi \dots$ 交換



◆ CD(charge dependent) Bonn Potential

R. Machleidt et al., Phys. Rev. C 63, 0240011 (2001)

- ◆ 荷電依存項を含む。

Argonne Potential

- ◆ Argonne V_{14} R. B. Wiringa et al., Phys. Rev. C **29**, 1207 (1984)

$$v_{14} = \sum_{p=1}^{14} \left[v_{\pi}^p(r) + v_I^p + v_S^p(r) \right] \mathcal{O}^p$$

$$v_{\pi}^p(r) \quad \text{OPEP}$$

$$v_I^p(r) = I^p Z_{\pi}^2(r) \quad \text{現象論的な中間距離領域}$$

$$v_S^p(r) = S^p \frac{1}{1 + e^{(r-R)/a}}, \quad R = 0.5 \text{ fm}, \quad a = 0.2 \text{ fm}$$

現象論的な短距離領域

$$\mathcal{O}^p = \left[1, (\sigma_1, \sigma_2), S_{12}, (L \cdot S), L^2, L^2(\sigma_1, \sigma_2), (L \cdot S)^2, \right. \\ \left. \left[1, (\sigma_1, \sigma_2), S_{12}, (L \cdot S), L^2, L^2(\sigma_1, \sigma_2), (L \cdot S)^2 \right] (\tau_1 \cdot \tau_2) \right]$$

- ◆ Argonne V_{18} R. B. Wiringa et al., Phys. Rev. C **51**, 38 (1995)

AV14 に荷電依存項を考慮したもの。オペレーターは4つ増えて18個。

参考文献

- ◆ R. Machleidt, Adv. Nucl. Phys. 19, 189-376 (1989)
“The Meson Theory of Nuclear Forces and Nuclear Structure”
- ◆ 大学院原子核物理(中村誠太郎監修、講談社サイエンティフィック) 玉垣良三著 「核力の多面性」